TOPP-Buchreihe Elektronik 42

Bergtold

Elektronik-Bauelemente 3

TOPP

-Reihe »Elektronik« 42

Fritz Bergtold

Elektronik-Bauelemente

3

Verlag Frech Stuttgart-Botnang

© 1969 Verlag und Druckerei M. Frech Stuttgart-Botnang Druck: Frech, Stuttgart-Botnang

Vorwort

Der Inhalt dieses Buches ist eine weitere Hilfe für ein praxisnahes Studium der Steuer- und Elektronik-Bauelemente sowie der Schaltungen, in denen diese Bauelemente verwendet werden.
Wie die anderen Bände dieser Elektronik-Bauelemente-Reihe möchte das Buch dem Leser die einzelnen Elektronik-Bauelemente im Zusammenhang mit dafür typischen Anwendungen persönlich vertraut machen.
Auch hierbei handelt es sich um eine bunte Reihe selbständiger Kapitel. Jedes von ihnen kann der Leser für sich genommen durcharbeiten, falls das darin behandelte Thema ihn gerade besonders interessiert. Er kann die Reihenfolge, in der er die Kapitel zu studieren gedenkt, ohne irgend einen Nachteil für seinen Studienerfolg völlig nach Belieben oder ganz den beruflichen Erfordernissen gemäß wählen. Er wird beim Studium jedes Kapitels nicht nur die für die Praxis wichtigen Informationen über das in der Kapitelüberschrift genannte Bauelement gewinnen, sondern darüber hinaus seine Kenntnisse bezüglich der Elektronik ganz allgemein erweitern können. Die zu den einzelnen Schaltungen eingefügten Bemessungs-Hinweise dürften für nicht wenige Leser von wesentlichem Interesse sein.
Wer es zunächst recht eilig hat, und bereits über einige Vorkenntnisse verfügt, dem geben die anschaulichen Schaltpläne und Kennlinienbilder mit ihren speziellen Unterschriften sowie die Zusammenfassung des Wichtigsten die Möglichkeit einer zeitsparenden Orientierung über das jeweils Gebotene.
Wer eine Auskunft über eine Einzelfrage sofort benötigt, wird sich mit Vortell des reichhaltigen Sachverzeichnisses bedienen.
Wer einen Überblick über die behandelten Themen gewinnen möchte, findet die Kapitelüberschriften — auch die der anderen beiden Bände — auf den folgenden Seiten.

F. Bergtold

Inhalt Band 1

Gleichstromquelle — ihr Sinn und Zweck
Gleichstromquellen in Schaltungen
Widerstand, Widerstandswert und Leitwert
Einstellwiderstände und einstellbare Spannungsteiler
Heiß- und Kaltleiter
Photoleiter
Kondensator an Batterie
Widerstand und Kondensator als RC-Glied
Induktivität beim Schließen eines Gleichstromkreises
Induktivität und Freilaufdiode
Ventil-Diode im Einweggleichrichter
Transistoren zum Schalten von Relais
Z-Dioden für das Stabilisieren von Gleichspannungen
Transistoren in Verstärkerstufe
Transistoren in Gleichspannungskonstanthaltern
Glimmröhren in Kippschaltung

Inhalt Band 2

Glimmrelaisröhre in Zeitschalter
Photodiode als »Lichtfühler« in Lichtrelais
Spannungsabhängiger Widerstand (VDR) als Überspannungsschutz
Ventil-Dioden in Dioden-Verknüpfungsgliedern
Komplementär-Transistoren in Blinkschaltung
Wechselstrom und Wechselspannungsquellen
Photoelement als Lichtfühler
Phototransistor in einem Lichtrelais
Glimmröhre zum Stabilisieren von Gleichspannungen
Silizium-npn-Transistor im Inverter
Kondensator an Wechselstromquelle
Elektronischer Druckknopf zum Ein- und Ausschalten
RC-Glied an Wechselspannung
Feldeffekt-Transistor in Verstärkerschaltung
Selen-Ventile im Graetzgleichrichter

Inhalt

Transistor als Emitterfolger 9
Komplexer Wechselstrom-Widerstand und Leitwert 11
Thyristor als Wechselstromschütz 16
Transistor und Ventildiode als Umschalter 23
npn-Transistoren in Schmitt-Trigger 26
Thyristor als Notlichtschalter 32
Glimmthyratron in Dämmerungsschalter 34
Transformator in Wechselstrom-Netzteil 37
Fremdgeheizte Heißleiter als ferngesteuerte Stellwiderstände 43
Thyristor zum Steuern eines Universalmotors 47
Referenzverstärker in Gleichspannungs-Stabilisator 51
Tunnel-Diode in Impuls-Restaurierungsstufe 54
Triac als Wechselstromschalter 58
Feldplatte in einer Schaltung als Magnetfeldfühler . 61
Mehrfach-Transistor für Flüssigkeitsstands-Kontrolle 64
Ventildiode in Transistor-Schutzschaltung 67
Hallgenerator zum Überwachen niedriger Drehgeschwindigkeiten 69
Diac und Triac zum Wechselstrom-Einstellen 72
Thyristor zum Steuern eines Gleichstrommotors .. 75

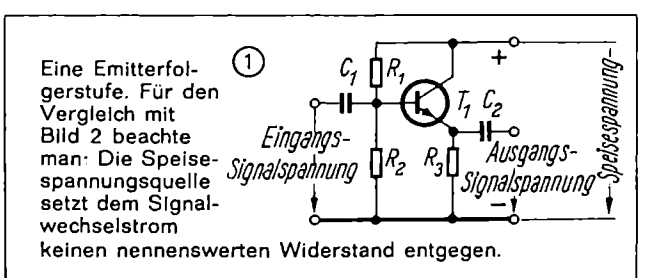
Transistor als Emitterfolger

Emitterfolger gleich Collectorschaltung

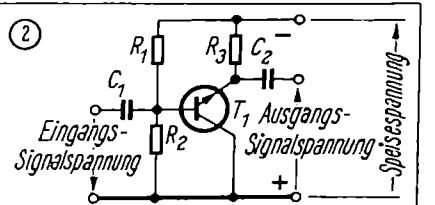
Emitterfolger ist die besondere, vor allem in Laboratorien verwendete Bezeichnung für eine Transistor-Verstärkerstufe in Collectorschaltung nach **Bild 1** oder auch nach **Bild 2.**

Mit »Emitterfolger« drückt man aus, daß die Last bzw. die folgende Stufe mit ihrem Eingang (einerseits) an den Emitter des Emitterfolgers (und anderseits an Masse) angeschlossen wird.

Mit »Collectorschaltung« deutet man an, daß der Collector dem Signal-Eingangskreis und dem Signal-Ausgangskreis gemeinsam ist. Das zeigt sich in der Schaltung nach Bild 2 unmittelbar, während man für die Schaltung nach Bild 1 voraussetzen muß, daß die Speisespannungsquelle für das Signal einen Kurzschluß darstellt.



Eine Emitterfolgerstufe. Für den Vergleich mit Bild 2 beachte man: Die Speisespannungsquelle setzt dem Signalwechselstrom keinen nennenswerten Widerstand entgegen.



Eine Stufe in Collectorschaltung. Sie hat, weil die Speisespannungsquelle für den Signalwechselstrom einen Kurzschluß darstellt, die Eigenschaften der Schaltung nach Bild 1.

Emitterfolger als Verstärker?

Die Basis-Emitter-Spannung, mit der ein Transistor gesteuert wird, beträgt nur wenige zehntel Volt. Beachtet man das, so erkennt man anhand des Bildes 1 sofort, daß die Ausgangs-Signalspannung des Emitterfolgers mit seiner Eingangs-Signalspannung nahezu übereinstimmt. Dies trifft natürlich auch für die Schaltung nach Bild 2 zu.

Im Emitterfolger wird die Signalspannung somit nicht erhöht. Ganz genau genommen ist sie im Ausgang des Emitterfolgers sogar ein wenig niedriger als an dessen Eingang.

Aber — der Ausgangswiderstand des Emitterfolgers beträgt nur einen Bruchteil seines Eingangswiderstandes. Demgemäß ist am Ausgang des Emitterfolgers ein Vielfaches des Eingangs-Signalstromes verfügbar. Höherer Wert des Ausgangs-Signalstromes bei Gleichheit der Werte der Signal-Eingangs- und Ausgangsspannung bedeutet eine Leistungsverstärkung. Der Emitterfolger ist somit eine echte Verstärkerstufe.
Es handelt sich jedoch im Emitterfolger nicht um eine solche Verstärkung, die sich in der Spannung äußert, sondern um eine Verstärkung, bei der der höhere Ausgangsstrom die höhere Ausgangsleistung bedingt.

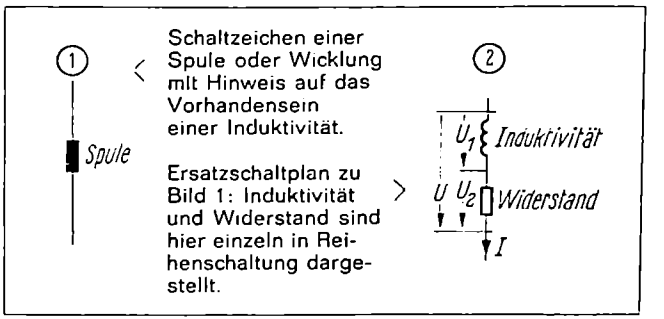
Der Emitterfolger, ein Widerstandswandler

Wegen seines relativ hohen Eingangswiderstandes kann der Emitterfolger mit einer Schaltung gesteuert werden, deren Ausgangswiderstand hoch ist.
Wegen seines verhältnismäßig niedrigen Ausgangswiderstandes können an einem Emitterfolger entsprechend niedrige Lastwiderstände angeschlossen werden. Das nutzt man vielfach aus:
Eine Schaltung, die nur einen einigermaßen geringen Laststrom verträgt, kann man damit für einen weit höheren Laststrom verwenden, daß man zwischen den Ausgang dieser Schaltung und die Belastung einen Emitterfolger einfügt. Hierbei wirkt der Emitterfolger insofern als Widerstandswandler als er am Ausgang der Schaltung, an die er angehängt ist, statt des niedrigen Lastwiderstandes seinen hohen Eingangswiderstand zur Geltung kommen läßt.
Statt »Widerstandswandler« sagt man im Zusammenhang mit dem Emitterfolger oft auch **Impedanzwandler.** Impedanz ist die Bezeichnung des allgemeinen Wechselstromwiderstandes.

Wichtigstes über Emitterfolger

- Der Emitterfolger ist eine mit einem npn- bzw. pnp-Transistor bestückte Verstärkerstufe, an der die Ausgangs-Signalspannung zwischen dessen Emitter und Masse auftritt.
- Eingangs- und Ausgangs-Signalspannung des Emitterfolgers haben fast gleiche Werte.
- Am Ausgang des Emitterfolgers ist aber ein Signalstrom verfügbar, der ein Vielfaches des Eingangs-Signalstromes beträgt.
- Es hat nämlich der Signal-Ausgangswiderstand des Emitterfolgers einen wesentlich kleineren Wert als dessen Signal-Eingangswiderstand.
- Demzufolge bezeichnet man den Emitterfolger mitunter als Widerstands- oder Impedanzwandlerstufe.
- Der Emitterfolger wird des öfteren auch Collectorschaltung genannt, weil hierbei der Collector dem Signal-Eingangskreis und dem Signal-Ausgangskreis gemeinsam ist.

Komplexer Wechselstrom - Widerstand und Leitwert



Vorbemerkung

Wem das Studium dieses Kapitels größere Schwierigkeiten bereiten sollte, der begnüge sich zunächst mit den ersten drei Abschnitten und greife gegebenenfalls nochmals auf die Kapitel »Kondensator an Wechselstromquelle« und »RC-Glied an Wechselspannung« (Bauelemente 2) zurück.

Eine Spule

Eine Spule hat einen Drahtwiderstand, den man meistens näherungsweise als frequenzunabhängig ansehen darf, sowie eine Induktivität. Diese Induktivität wirkt den Strom-**Änderungen** entgegen. Deshalb drosselt sie einen Wechselstrom umsomehr, je höher dessen Frequenz ist. Legt man eine Spule an eine Wechselspannung, so ist wegen ihrer Induktivität der von der Wechselspannung bewirkte Spulen-Wechselstrom geringer als bei alleinigem Auswirken des Drahtwiderstandes.

Man kann die Spule daher auffassen als die Reihenschaltung ihrer Induktivität mit ihrem Drahtwiderstand (**Bilder 1** und **2**).
Wegen der den Wechselstrom drosselnden Wirkung von Spulen hat man so benutzte Spulen auch **Drosselspulen** genannt.

Wirk- und Blindwiderstand

Während in einem Widerstand elektrische Leistung in Wärmeleistung umgesetzt wird und so als elektrische Leistung verlorengeht, drosselt die Induktivität den Wechselstrom verlustlos: Die Wechselspannung dient hierbei zum Auf- und Abbau des Magnetfeldes, das sich Hand in Hand mit dem Strom-Augenblickswert abwechselnd in der einen und anderen Richtung aufbaut und dazwischen abbaut. Das, was beim Aufbau an elek-

trischer Arbeit in Form des Magnetfeldes gespeichert wird, geht beim Abbau des Magnetfeldes jeweils — wieder als elektrische Arbeit — an den Stromkreis zurück.

Die Tatsache, daß im Drahtwiderstand elektrische Leistung als solche verbraucht wird und in der Induktivität keine elektrische Leistung verloren geht, deutet man an, indem man den Drahtwiderstand als **Wirkwiderstand** und den »induktiven Widerstand« als **Blindwiderstand** bezeichnet.

Die Wechselspannung an einem Wirkwiderstand und der hierzu gehörende, den Wirkwiderstand durchfließende Wechselstrom sind miteinander in Phase.

Gegen die Wechselspannung an einem Blindwiderstand ist der damit durch den Blindwiderstand getriebene Wechselstrom um ein Viertel einer Periode phasenverschoben.

Induktivität und induktiver Widerstand

Die Induktivität rührt daher, daß ein elektrischer Strom stets in Verkettung mit einem Magnetfeld auftritt. Damit der Strom Hand in Hand mit dem Magnetfeld zustande kommt, muß zum Aufbau des Magnetfeldes ein Betrag von Voltsekunden aufgebracht werden.

Die Rückwirkung des Magnetfeldes auf den Stromkreis ist umso größer je mehr Voltsekunden je Ampere des Stromes benötigt werden. Bedenkt man das, so kann man einsehen, daß die Einheit der Induktivität die Voltsekunde je Ampere ist.

Statt »**Voltsekunde je Ampere**« sagt man **Henry** (abgekürzt H). Es gilt somit:

$$\text{Einheit der Induktivität} = 1\ \text{H} = \frac{1\ \text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

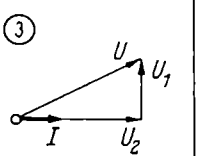
Das Formelzeichen für die Induktivität ist L. Der induktive Blindwiderstand ist, wie eingangs dieses Kapitels angedeutet, proportional der Frequenz f. Wegen des Vorverdrehens der Spannung an der Induktivität um ein Viertel einer Periode braucht man zusätzlich den »**Drehfaktor**« j. Hiermit gilt, wenn man statt der Frequenz f gleich die **Kreisfrequenz** (ω), nämlich das $2 \cdot \pi$-fache $\approx$ 6,28-fache davon einsetzt:

Induktiver Blindwiderstand $= \text{j} \cdot \omega \cdot L$

Induktiver und kapazitiver Blindwiderstand

Wie eine Induktivität, so stellt, wie wir wohl schon wissen auch eine Kapazität einen Blindwiderstand dar.

Ein Zeigerdiagramm zu Bild 2: Die Spannung am Widerstand ist mit dem Strom in Phase. Die Spannung an der Induktivität eilt ihm um ein Viertel einer Periode voraus (Nacheilen des Stromes gegenüber der Spannung).



Beide Blindwiderstände unterscheiden sich voneinander bezüglich des Vorzeichens der 90°-Verschiebung: Es handelt sich bei der Induktivität (Bild 2) um ein Nacheilen des Stromes gegenüber der Spannung und deshalb um ein Voreilen der Spannung gegenüber dem Strom (**Bild 3**). Bei der Kapazität ist's umgekehrt. Das zeigt ein zu der Schaltung nach **Bild 4** gehörendes Zeigerbild (Zeigerdiagramm) (**Bild 5**). Hier eilen der Strom der Spannung um ein Viertel einer Periode voraus und demgemäß die Spannung dem Strom um den das Viertel einer Periode darstellen den Phasenwinkel von 90° nach.

Resistanz, Reaktanz und Impedanz

In der Elektronik sagt man statt »Wirkwiderstand« »**reeller Widerstand**« oder »**Resistanz**« sowie statt »Blindwiderstand« »**imaginärer Widerstand**« oder »**Reaktanz**« und nennt den aus reellem und imaginärem Anteil zusammengesetzten Gesamtwiderstand »**komplexen Widerstand**« oder »**Impedanz**«.
Der komplexe (d. h. der zusammengesetzte) Wechselstromwiderstand hat demgemäß einen **Realteil** und einen **Imaginärteil.**
Übrigens sagte man früher statt Impedanz »Scheinwiderstand«.

Die Formelzeichen

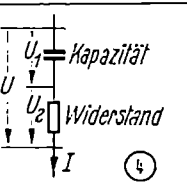
Als Formelzeichen dienen für den komplexen Widerstand Z, für den Realteil bzw. für den reellen Widerstand R und für den Imaginärteil bzw. für den imaginären Widerstand X. Zusätzlich benötigt man, wie bereits erwähnt, ein Formelzeichen für das Vor-Verdrehen um ein Viertel einer Periode. Dafür wurde das j festgelegt. Mit diesem Formelzeichen gilt:

$$Z = R + j \cdot X$$

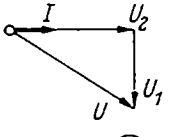
Den Charakter des Imaginären erhält das X erst mit dem Zufügen des Faktors j. Diesen Faktor nennt man deshalb auch **imaginäre Einheit.** Dafür gibt es eine vielbenutzte einfache Rechenregel:

$$\frac{1}{j} = -j$$

Reihenschaltung einer Kapazität mit einem ohmschen Widerstand. Es handelt sich hierbei um zwei Spannungen und einen Strom.



4



5

Ein Zeigerdiagramm zu der Schaltung nach Bild 4. Wieder ist die Spannung am Widerstand mit dem Strom in Phase. Die Spannung am Kondensator eilt dem Strom um ein Viertel einer Periode nach (Voreilen des Stromes gegenüber der Spannung).

Die Spannung eilt dem Strom bei positivem Zahlenwert von X voraus und bei negativem Zahlenwert von X nach. In den **Bildern 4** und **5** gelten folgende Zusammenhänge:

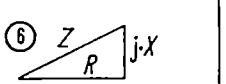
$$U_1 = j \cdot X \cdot I$$
$$U_2 = R \cdot I$$
$$U = Z \cdot I = (R + j \cdot X) \cdot I$$

Impedanz-Dreieck

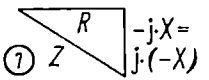
Teilt man in den Bildern 4 und 5 alle Spannungen durch I, so bleiben, gewissermaßen als Gerippe dieser Zeigerdiagramme, die in den **Bildern 6** und **7** gezeigten rechtwinkligen Dreiecke mit den die Werte

Z, R und $j \cdot X$

darstellenden Seitenlängen übrig. Sie veranschaulichen die jeweilige Beziehung zwischen der Resistanz I, der Reaktanz $j \cdot X$ und der Impedanz Z.



Das Impedanz-Dreieck, das aus dem Spannungszeiger-Dreieck von Bild 3 abgeleitet werden kann.



Impedanz-Dreieck zum Spannungszeiger-Diagramm von Bild 5. Zahlenwert von X positiv.

Komplexer Leitwert

Wie der komplexe (Wechselstrom-) Widerstand einen Wirk- und Blindanteil (einen Realteil und einen Imaginärteil) hat, so besteht auch der komplexe (Wechselstrom-) Leitwert aus zwei derartigen Anteilen, nämlich aus

einem **Wirkleitwert (reellen Leitwert, Leitwert-Realteil** oder **Conductanz)** und

einem **Blindleitwert (imaginärer Leitwert, Leitwert-Imaginärteil** oder **Susceptanz)**

Die Ausdrücke Conductanz und Susceptanz braucht man sich nicht unbedingt zu merken.

Die beiden Anteile eines komplexen Widerstandes entsprechen einer Reihenschaltung von zwei, diesen Anteilen entsprechenden Stromzweigen.

Die beiden Anteile eines komplexen Leitwertes können demgemäß betrachtet werden als die Leitwerte zweier einander parallel geschalteter Stromzweige.

Der komplexe Leitwert wird in der Elektronik und zunehmend auch in der übrigen Elektrotechnik **Admittanz** genannt. Leider gibt es immer noch viele Fachleute, die die Bezeichnung »Leitwert« sowohl für den reellen Leitwert (den Wirkleitwert) wie auch für den komplexen Leitwert verwenden und damit manche Verwirrung stiften! Deshalb sollte man bezüglich der Bezeichnung »Leitwert« Vorsicht walten lassen. Schlecht ist auch die früher übliche Bezeichnung »**Scheinleitwert**«.

Wichtigstes über Wechselstromwiderstände

- Wechselstromwiderstände sind im allgemeinen komplex. Komplex bedeutet hier »zusammengesetzt aus zwei prinzipiell verschiedenen Anteilen«.
- Der eine Anteil, der Wirkanteil, ist ein Wirkwiderstand, in dem elektrische Leistung in Leistung anderer Art — z. B. in Wärmeleistung — umgesetzt wird.
- Der Wirkanteil des Wechselstromwiderstandes wird in der Elektronik Realteil oder reelle Komponente genannt.
- Als Bezeichnung für den Wirkwiderstand verwendet man dementsprechend die Bezeichnung reeller Widerstand, wenn man nicht den Ausdruck Resistanz dafür wählt. Für reelle Widerstände (für Resistanzen) sind Wechselspannung und Wechselstrom phasengleich.
- Der andere Anteil, der Blindanteil, ist ein Blindwiderstand, der elektrische Leistung nur periodisch vorübergehend speichert, wobei keine elektrische Leistung als solche verloren geht.
- Der Blindanteil des Wechselstromwiderstandes wird in der Elektronik üblicherweise Imaginärteil genannt.
- Als Bezeichnung des Blindwiderstandes verwendet man in der Elektronik demgemäß meistens den Ausdruck »imaginärer Widerstand« oder statt dessen die Bezeichnung »Reaktanz«.
- Bei Reaktanzen sind Wechselspannung und Wechselstrom gegeneinander um ein Viertel einer Periode phasenverschoben (Voreilen oder Nacheilen der Spannung gegenüber dem Strom bzw. des Stromes gegenüber der Spannung).
- Die Phasenverschiebung von einem Viertel einer Periode wird in Formeln mit dem Faktor j kenntlich gemacht: Der Faktor j bedeutet ein Vorverschieben um ein Viertel einer Periode.
- Der Faktor j wird imaginäre Einheit oder seltener Drehfaktor genannt.
- Statt komplexer Wechselstromwiderstand sagt man vor allem im Rahmen der Elektronik meistens »Impedanz«.
- Realteil und Imaginärteil einer Impedanz entsprechen der Reihenschaltung eines Wirkwiderstandes mit einem Blindwiderstand.
- Ein Stromzweig mit einem komplexen Widerstand hat natürlich auch einen komplexen Leitwert. Den komplexen Leitwert nennt man Admittanz.
- Der komplexe Leitwert hat einen Realteil und einen Imaginärteil. Diese beiden Teile entsprechen einer Parallelschaltung.
- Die Bezeichnungen Scheinwiderstand für die Impedanz und Scheinleitwert für die Admittanz sollte man vermeiden. Sie sind unzutreffend und veraltet!

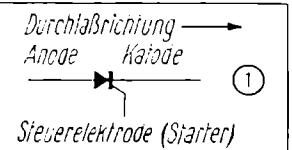
Thyristor als Wechselstrom-Schütz

Ein Wechselstrom-Schütz

Das ist ein elektrisch betätigter Wechselstrom-Schalter für hohe Schalthäufigkeit. Im allgemeinen wird ein solches Schütz heute noch als Schalter mit mechanisch bewegten Kontakten und elektromagnetischem Antrieb des bewegbaren Kontaktteils ausgebildet. Dabei versteht man unter hoher Schalthäufigkeit einen Schaltbetrieb, bei dem der Schalter in einer Minute bereits mehrmals betätigt werden kann.

Der Thyristor

Der Thyristor ist ein Halbleiter-Bauelement. Es besteht aus einem »**System**« mit drei (inneren) Anschlüssen und einem Gehäuse mit den äußeren Anschlüssen, die die Fortsetzungen der inneren Anschlüsse bilden. Das Thyristorsystem ist ein kleines Silizium-Kristallplättchen mit mehreren sich elektrisch verschieden verhaltenden Zonen.
Von **Kristallplättchen** spricht man da, weil in einem solchen Plättchen die Silizium-Atome genau geordnet enthalten sind. Das Silizium-Plättchen des Thyristors ist demgemäß eine kleine, dünne Scheibe von einem (weit größeren) **Silizium-Einkristall.**



Das Schaltzeichen eines Thyristors. Es ist aus dem Dioden-Schaltzeichen abgeleitet. Damit wird angedeutet, daß der Thyristor ebenso wie eine Ventil-Diode den Strom nur in eine Richtung durchläßt

Eine **Zone** bedeutet in einem Halbleiter-Bauelement eine Kristallschicht, in der Atome eines bestimmten anderen chemischen Elements in relativ geringer Anzahl und in einigermaßen regelmäßigen Abständen enthalten sind. Die einzelnen Zonen unterscheiden sich in erster Linie nach der Art dieser **Fremdatome** und in zweiter Linie nach der Dichte, mit der die Fremdatome in dem Kristall vorkommen.
Das Einbringen von Fremdatomen in ein Halbleiter-Kristall nennt der Fachmann »**Dotieren**«. Mit diesem Ausdruck kann man die verschiedenen **Kristallzonen** als in bestimmter Weise dotierte Schichten des Kristalls bezeichnen.

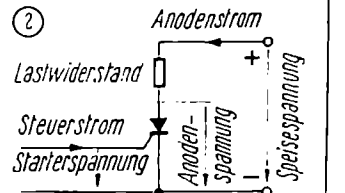
Anschlüsse und Schaltzeichen des Thyristors

Ein Thyristor hat drei Anschlüsse. Diese sind im Schaltzeichen berücksichtigt (**Bild 1**). Es handelt sich dabei um die Anschlüsse für
eine **Anode** (für den Strom-Durchlaß der positive Anschluß),

eine **Katode** (für den Strom-Durchlaß der negative Anschluß) und
eine **Steuerelektrode** (einen **Starter**) zum Einleiten des Durchlaßzustandes (zum **Starten** des Stromdurchgangs.
Der Thyristor wird mit dem Anodenanschluß und dem Katodenanschluß in den Weg des zu schaltenden Stromes eingefügt. Die Steuerelektrode — auch als **Starter, Tor, Gitter** oder **Gate** (sprich gäit) bezeichnet — dient zum Entsperren der Anoden-Katoden-Strecke des Thyristors.

Prinzipielles Verhalten des Thyristors

Der Thyristor wird oft als **steuerbares elektrisches Silizium-Ventil** bezeichnet. Das kommt auch in seinem Schaltzeichen (Bild 1) zum Ausdruck.
Ein sonstiges **Siliziumventil** läßt den Strom in der einen der beiden Stromrichtungen (Richtung Anode—Katode) durch und sperrt ihn in der Gegenrichtung. Im Thyristor besteht zunächst für beide Stromrichtungen der Sperrzustand.
Mit der Steuerelektrode kann der Stromdurchgang durch den Thyristor in der Richtung Anode—Katode eingeleitet, jedoch nicht wieder aufgehoben werden.
Den Sperrzustand muß man damit wiederherstellen, daß man den die Anoden-Katoden-Strecke passierenden Strom bis auf denjenigen sehr geringen Wert absenkt, bei dem der Stromdurchgang abreißt.



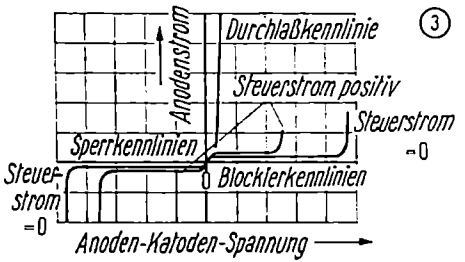
Spannungen und Ströme beim Thyristor. Die Pfeile kennzeichnen die Polungen bzw. Richtungen, für die die Formelzeichen mit positiven Vorzeichen gelten.

Thyristor-Kennlinien

Natürlich bestehen für den Thyristor zahlreiche Zusammenhänge, die seine Betriebseigenschaften betreffen. Alle diese Zusammenhänge können irgendwie mit Kennlinien veranschaulicht werden. Das grundsätzliche Verhalten des Thyristors ist mit dem

- Anodenstrom als Folge des Zusammenwirkens der
- Anoden-Katoden-Spannung (kurz Anodenspannung genannt) und dem
- Steuerstrom bzw. der ihn verursachenden Starter-Katoden-Spannung (kurz der **Starterspannung**)

gegeben. Die eben genannten Größen sind in **Bild 2** eingetragen.
Bild 3 enthält die das grundsätzliche Verhalten des Thyristors darstellenden Kennlinien. In diesem Bild sind links unten zwei zu negativen Werten der Anoden-Ka-



Die Thyristor-Kennlinien, die zeigen, wie der Anodenstrom von der Anoden-Katoden-Spannung einmal bei fehlendem Starterstrom und einmal bei einem positiven Starterstrom abhängt.

toden-Spannung gehörende **Sperr-Kennlinien** enthalten. Die eine dieser Sperrkennlinien betrifft den Fall des fehlenden Steuerstromes. Die andere dieser Sperrkennlinien ist ein Beispiel für alle diejenigen Sperrkennlinien, die sich bei positiven Steuerströmen ergeben könnten: Je höher der Steuerstromwert ist, desto höher fällt der Sperrstrom aus und desto eher steigt sein Betrag abrupt an.

Rechts unten sind in Bild 3 die dementsprechenden Sperrkennlinien für positive Werte der Anoden-Katoden-Spannung zu sehen. Jede solche Kennlinie endet, wenn ein jeweils bestimmter Wert des Anodenstromes überschritten wird. Diese Kennlinien nennt man im Gegensatz zu den **echten Sperrkennlinien,** die für negative Werte der Anoden-Katoden-Spannung gelten, auch **Blockier-Kennlinien.**

Dicht rechts neben der senkrechten Anodenstrom-Achse des Bildes 3 verläuft die Thyristor-**Durchlaßkennlinie.** Sie entspricht der Durchlaßkennlinie eines Silizium-Ventils. Das Bemerkenswerte an dieser Thyristor-Kennlinie ist, daß sie vor Erreichen des **Achsenkreuz-Nullpunktes** endet. (Unter einem derartigen Nullpunkt versteht man den Punkt zu dem sowohl auf der waagerechten wie auch auf der senkrechten Achse der Wert Null der jeweils aufgetragenen Größe gehört). Dieses Enden der Durchlaßkennlinie entspricht dem tatsächlichen Verhalten des Thyristors: Wird sein Anodenstrom auch nur ein klein wenig weiter abgesenkt, als das dem unteren Endpunkt der Durchlaßkennlinie entspricht, so kippt der Thyristor in den **Blockierzustand** zurück.

Der Anodenstrom, der zum unteren Ende der Durchlaßkennlinie gehört, heißt **Haltestrom.** Das ist nämlich der tiefste Wert des Anodenstromes, bei dem der Durchlaßzustand erhalten bleibt.

Unbedingt zu beachten ist für das Studium des Bildes 3:

- In Bild 3 sind die zur Durchlaßkennlinie gehörenden Spannungen im Vergleich zu den Spannungen, die die Sperr- und Blockierkennlinien betreffen, stark über-

trieben: Die Durchlaßspannungen betragen je nach Anodenstrom 0,7 V bis etwa 2 V. Die Sperrspannungen und die Blockierspannungen belaufen sich für fehlenden Steuerstrom je nach Thyristor-Typ normalerweise auf ungefähr 60 V bis auf 1600 V.

- Die betriebsmäßigen Werte des Durchlaßstromes übersteigen den von dem Bild 3 erfaßten Strombereich sehr weit. Hierzu zwei Beispiele: Bei einem Kleinthyristor, dessen Nennstrom 0,5 A beträgt, hat man mit Sperrströmen bis 1 mA und mit einem Haltestrom bis 20 mA zu rechnen. Bei einem Leistungsthyristor für einen Nennstrom von 30 A liegt der maximale Haltestrom bei 100 mA.
- Viele Leute verwenden bezüglich der Thyristoren der Kürze halber noch Ausdrücke, die aus längst vergangenen Zeiten stammen, aus Zeiten, in denen diese Ausdrücke zwar für ganz andere Vorgänge und Bauelemente, für diese aber immerhin mit einigem Recht in Betracht kamen. Diese Ausdrücke sind:

Zünden = Entsperren des Thyristors, d. h. Kippen des Thyristors aus dem Blockierzustand in den Durchlaßzustand. Dazu gehören weitere Ausdrücke wie

Zündstrom = zum Entsperren dienender Starterstrom

Zündspannung = Starter-Katoden-Spannung, die diesen Strom bewirkt, und

Zündelektrode = Starter.

Löschen = Bewirken des Zurückfallens des Thyristors aus seinem Durchlaßzustand in den Blockierzustand.

Außerdem gibt es noch den Ausdruck: **positiver Sperrstrom.** Damit ist der Blockierstrom gemeint.

Über die Funktion des Thyristors

Die Spitzen-Beträge der Speisespannung müssen mit Sicherheit niedriger sein als diejenigen zu fehlendem Steuerstrom gehörenden Anoden-Katoden-Spannungsbeträge, bei denen der Sperrstrom-Steilanstieg bzw. der Blockierstrom-Steilanstieg mit Sicherheit noch nicht einsetzen. In den Datenlisten sind dazu die höchstzulässigen positiven und negativen **periodischen Spitzensperrspannungen** genannt. Aus Sicherheitsgründen sollte man jeweils einen Thyristortyp wählen, dessen höchstzulässige periodische Spitzensperrspannung bei Wirklast etwa gleich dem 1,5-fachen und bei anderer Last ungefähr gleich dem doppelten Scheitelwert der maximalen Netzwechselspannung ist.

Bei zeitlichem Sinusverlauf der Wechselspannung und ohmschem Lastwiderstand muß dieser mindestens den Wert haben, der sich ergibt, wenn man

- den zeitlichen Mittelwert der für den Thyristor positiven Wechselspannungshalbwellen durch den
- in den Datenlisten genannten Thyristor-Nennstrom teilt

und darf nicht höher sein als der (recht hohe) Wert, der herauskommt, wenn der Scheitelwert der Speisewech-

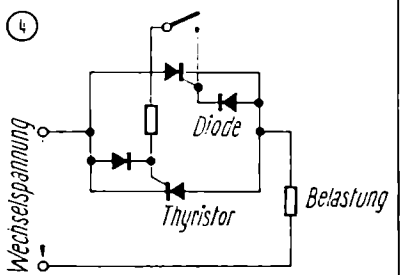
selspannung durch den Haltestromwert (in den Datenlisten enthalten) geteilt wird.
Von der Wechselspannung ist meistens der Effektivwert bekannt. Bei Sinusverlauf (wie er für die Netzwechselspannung hinreichend zutrifft) gelten:
Scheitelwert $\approx$ 1,41 · Effektivwert sowie
zeitlicher Mittelwert der Spannungshalbwellen mit gleichem Vorzeichen $\approx$ Scheitelwert : 3,14. Daraus folgt: zeitlicher Mittelwert der positiven Spannungshalbwellen $\approx$ Effektivwert · 1,41 : 3,14 $\approx$ Effektivwert · 0,45.
Bei Vorhandensein einer positiven Anoden-Katoden-Spannung wird mit einem passenden Starterstrom bzw. mit einer ihn bewirkenden Starter-Katoden-Spannung (von z. B. 6 V) im Thyristor der Vorgang bewirkt, dem das Überschreiten des oberen Endes der dazu gehörenden Blockierkennlinie entspricht. Hiermit kippt der Thyristor aus dem Blockierzustand in den Durchlaßzustand. Der so eingeleitete Stromdurchgang kann mittels des Starters (der Steuerelektrode) nicht weiter beeinflußt werden.
Wenn die Speisespannung absinkt oder der Lastwiderstand erhöht wird, nimmt natürlich der Wert des den Thyristor durchfließenden Stromes ab. Dabei geht die Thyristor-Durchlaßspannung aber nur wenig zurück (siehe Bild 3). Erst wenn mit dem Absinken der Speisespannung oder dem Erhöhen des Lastwiderstandes der Haltestromwert unterschritten wird, kippt der Thyristor in den Blockierzustand zurück.

Zwei Möglichkeiten für das Thyristor-Wechselstromschütz

Ein Thyristor kann lediglich für die eine der beiden Stromrichtungen in den Durchlaßzustand versetzt werden.
Mit einem einzelnen Thyristor ist daher ein Wechselstrom-Schalter nur zu bauen, wenn man den Thyristor mit einer Gleichrichter-Schaltung kombiniert: Damit wird es möglich, den Thyristor während jeder Wechselspannungs-Halbwelle in den Durchlaßzustand zu versetzen: Die Gleichrichter-Schaltung bewirkt, daß für den Thyristor beide Wechselspannungs-Halbwellen mit derselben Polung auftreten.
Bei Verwenden eines Thyristor-Paares erübrigt sich der Gleichrichter.

Die hier gewählte Schaltung und ihre Funktion

Wenn man die beiden Thyristoren in **Antiparallel-Schaltung** kombiniert, wie dies im Schaltplan (**Bild 4**) gezeigt wird, steht für jede der beiden Polungen der Wechselspannungs-Halbwellen jeweils einer der zwei Thyristoren zur Verfügung. Zusätzlich zu den Thyristoren benötigt man zu jedem Thyristor eine Diode und insgesamt einen **Begrenzungswiderstand** (einen **Schutzwiderstand**).
Ist der im Schaltplan (Bild 4) eingetragene Schalter of-



Zwei Thyristoren in Antiparallelschaltung mit zwei Dioden und einem Schutzwiderstand — als Wechselstromschalter benutzt. Geschaltet wird mit dem mechanisch betätigten Schalter nur der Starterstrom.

fen, so bleiben beide Thyristoren gesperrt. Sie erhalten zwar über die angeschlossene Belastung wechselweise positive Anoden-Katoden-Spannungen, aber keine Starter-Katoden-Spannungen.

Wird der Schalter geschlossen, so ergibt sich z. B. für den im Schaltplan oben eingetragenen Thyristor außer einer positiven Anoden-Katoden-Spannung (über die angeschlossene Belastung) unter Vermittlung

- der im Schaltplan unten eingezeichneten Diode, die sich dafür im Durchlaßzustand befindet,
- des Begrenzungswiderstandes, der den Starterstrom begrenzt, und
- des Schalters, der ja jetzt geschlossen ist,

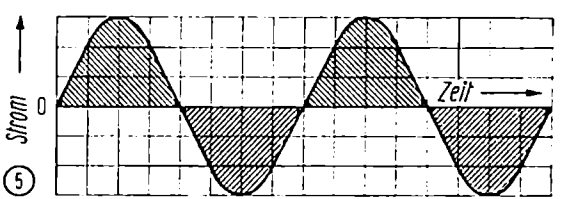
ein den Durchlaßzustand bewirkender Starterstrom. Die andere Diode befindet sich bezüglich dieses Stromes im Sperrzustand.

Das **Bild 5** zeigt den zeitlichen Verlauf des von einem solchen Schütz durchgelassenen Wechselstromes. Wenn man genau hinsieht, kann man erkennen, daß sowohl am Anfang wie auch am Ende einer jeden Strom-Halbwelle ein kleiner Abschnitt fehlt.

Das Fehlen eines Abschnittes am Halbwellen-Anfang folgt daraus, daß der Blockierzustand erst aufgehoben wird, wenn die Starter-Katoden-Spannung und die Anoden-Katoden-Spannung ihre dafür in Frage kommenden unteren Grenzwerte überschreiten.

Das Fehlen eines Abschnittes am Halbwellen-Ende ergibt sich insofern, als der Durchlaßzustand endet, wenn der Haltestromwert unterschritten wird.

Sobald der Schalter wieder geöffnet ist, besteht bezüglich der dann beginnenden positiven Halbwelle der



Ist in der Schaltung nach Bild 4 der Schalter geschlossen, so ergibt sich bei zeitlichem Sinusverlauf der Netzwechselspannung und ohmschem Lastwiderstand dieser zeitliche Stromverlauf.

Wechselspannung keine Bedingung für den Durchlaßzustand des Thyristors.
Im Wechselstrombetrieb kann man somit den den Thyristor passierenden Strom tatsächlich
nicht nur mit dem Schließen des Schalters in der Schaltung nach Bild 4 in Gang bringen und ihn mit dem geschlossenen Schalter während jeder positiven Halbwelle der Wechselspannung von neuem fließen lassen sondern sein Auftreten auch mit dem Öffnen des Schalters für die auf den Zeitpunkt des Öffnens folgenden positiven Halbwellen unterbinden.
Im Gegensatz zu einem Schalter mit mechanisch bewegten Kontakten unterbricht der Thyristor den Strom nur beim Unterschreiten eines minimalen Wertes (des Haltestromwertes). Das kann gelegentlich einen beachtenswerten Vorteil bedeuten.

Wichtigstes über Thyristoren und Thyristor-Wechselstromschalter

- Ein Thyristor ist ein steuerbares Siliziumventil, das den Stromdurchgang außer für negative Anoden-Katoden-Spannungen sperren auch für positive Anoden-Katoden-Spannungen blockieren kann.
- Das Kippen aus dem Blockierzustand in den Durchlaßzustand ist mit einer Starter-Katoden-Spannung von wenigen Volt zu erreichen.
- Das Zurückkippen in den Blockierzustand ergibt sich lediglich bei Absenken des Anodenstromes unter den dafür geltenden (sehr niedrigen) Haltestromwert.
- Zwei Thyristoren kann man in Antiparallel-Schaltung als Wechselstrom-Schütz verwenden.
- Um die zwei Thyristoren mit Schließen eines Steuerschalters jeweils wechselweise in den Durchlaßzustand versetzen zu können, benötigt man zusätzlich zu den beiden Thyristoren nur zwei Dioden und einen Begrenzungswiderstand.
- Dioden und Begrenzungswiderstand brauchen lediglich für den Starterstrom bemessen zu werden.
- Ein Nachteil gegenüber einem elektromechanischen Schütz ist der im Sperrzustand durchgelassene Strom (bei 25 °C jedoch nur einige Mikroampere).
- Der zweite, etwas größere Nachteil besteht darin, daß im Durchlaßzustand auf die Thyristor-Antiparallel-Schaltung eine Restspannung entfällt (im Mittel etwa 1,5 V), die für die angeschlossene Last verloren geht.
- Als Vorteile des Thyristors gegenüber einem elektromechanischen Schütz kann man dem gegenüberstellen: Höhere Schaltgeschwindigkeit, kein Abnützen, kein Erfordernis einer Wartung, kein Funkenbilden, kein Kontakt-Prellen, keine Empfindlichkeit gegen Erschütterungen und — was oft besonders wichtig ist — kein gesondert zuzuführender Hilfsstrom.

Transistor und Ventil-Diode als Umschalter

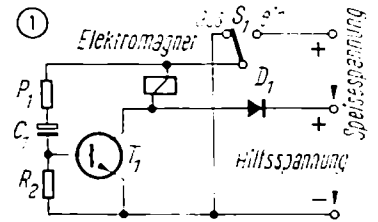
Anziehen und Halten eines Magnetankers

Um einen Elektromagneten mit Gleichstrom rasch zu »**erregen**« ist zum Ingangbringen des Magnetisierungsstromes und für den damit zusammenhängenden Aufbau des Magnetfeldes eine hohe Gleichspannung erforderlich. Mittels des so aufgebauten Magnetfeldes wird der Anker des Elektromagneten angezogen, wenn das Magnetfeld die dafür erforderliche Dichte hat. Zu dieser Magnetfelddichte gehört ein entsprechend hoher **Anzugsstrom.**
Zum Halten des angezogenen Ankers genügt in der Regel ein wesentlich geringerer Strom und für diesen auch eine niedrigere Spannung. Das heißt, kurz ausgedrückt:

Der **Haltestrom** des Magneten, nämlich der Strom, der zum Halten des angezogenen Ankers genügt, braucht nicht so hoch zu sein, wie der **Anzugsstrom,** der zum Anziehen des Ankers notwendig ist.

Eine Erläuterung

Diesen Abschnitt braucht nur derjenige Leser zur Kenntnis zu nehmen, der wissen möchte, warum der Haltestrom einen geringeren Wert haben darf als der Anzugsstrom.
Solange der Anker des Elektromagneten noch nicht angezogen ist, muß das Magnetfeld auch in dem Zwischenraum zwischen dem Elektromagneten und seinem Anker ausgebildet werden. Deshalb hat man es bei noch nicht angezogenem Anker mit einem ziemlich hohen magnetischen Widerstand zu tun. Bei angezogenem Anker beschränkt sich das Magnetfeld im wesentlichen auf den Eisenkern des Elektromagneten und dessen Anker. Das bedeutet einen wesentlich kleineren magnetischen Widerstand.
Der **magnetische Widerstand** ist das Verhältnis des Produktes aus Strom und Windungszahl zum Wert des dazu gehörenden Magnetfeldes. Als Einheit des Magnetfeldwertes verwendet man die Voltsekunde je Windung. Hieraus folgt als Einheit des magnetischen Widerstandes, bezogen auf eine Wicklung, die nur eine einzige Windung hat, das Ampere je Voltsekunde.



In dieser Schaltung ist beim Einschalten mit dem Schalter der Elektromagnet zunächst von dem Strom durchflossen, der von der von der Summe aus Speisespannung und Hilfsspannung bewirkt wird. Im Dauerzustand ist der Transistor gesperrt, wobei für den Strom durch den Elektromagneten nurmehr die Speisespannung wirksam bleibt.

Eine Schaltung

Die mit dem Anzugsstrom und dem Haltestrom gegebenen beiden Stromstufen kann man mit zwei verschieden hohen Gleichspannungen und einem Umschalter erreichen. Dieser Umschalter darf natürlich erst dann auf die geringere Spannung umschalten, wenn der Anker angezogen ist.

In der mit **Bild 1** gezeigten Schaltung geschieht das Umschalten automatisch: Zum Einschalten bringt man den Schalter S_1 in die der Zeichnung entgegengesetzte Stellung. So verbindet man den Pluspol der Speisespannung mit dem in Bild 1 oben eingetragenen Wicklungs-Anschluß des Elektromagneten sowie zusätzlich mit dem dort ebenfalls oberen Ende des Widerstandes R_1.

Der Kondensator C_1 ist zunächst noch ungeladen. Folglich kann über R_1 ein hoher Basisstrom zustande kommen. Dieser schaltet den Transistor durch. Über den Transistor ist die Wicklung (mit ihrem in Bild 1 unten eingetragen Ende) jetzt an den Minuspol der Hilfsspannung angeschlossen. Abgesehen von der geringen Collector-Emitter-Restspannung des Transistors liegt die Elektromagnet-Wicklung deshalb an der Gesamtspannung (Summe aus Speisespannung und Hilfsspannung). Dabei ist die Diode mit der Hilfsspannung in Sperrichtung vorgespannt und folglich gesperrt.

Inzwischen wird der Kondensator C_1 aufgeladen. Der Kondensator-Ladestrom wird von der Gesamtspannung (Summe aus Speisespannung und Hilfsspannung) bewirkt. Er durchfließt Widerstand R_1 und die Parallelschaltung von R_2 mit der Basis-Emitter-Strecke des Transistors. Deren Widerstandswert ist etwa mit dem Verhältnis der Basis-Emitterspannung (bei Silizium-Transistoren im Durchlaßzustand etwa 0,8 V) zu dem Basisstrom gegeben. Der Basisstrom hat anfangs einen relativ hohen Wert. Von Seiten des Transistors ergibt sich dieser, wenn man den Collectorstrom durch den **Stromverstärkungsfaktor** des Transistors, d. h. durch dessen Collector-Basis-Stromverhältnis, teilt. Dieser Stromverstärkungsfaktor (Formelzeichen B) ist in den einschlägigen Datenlisten angegeben.

Zunächst spielt deshalb der Widerstand der Parallelschaltung von R_2 mit der Basis-Emitter-Strecke des

Transistors T_1 gegen den Widerstand R_1 keine bedeutende Rolle, sodaß der Kondensator C_1 von der Gesamtspannung erst einmal entsprechend der Zeitkonstante $C_1 \cdot R_1$ aufgeladen wird. Mit zunehmender Aufladung des Kondensators nimmt dessen Ladestrom ab. Gemeinsam mit dem Ladestrom nimmt auch der Basisstrom des Transistors ab. Bei sinkendem Basisstrom steigt der Widerstand der Collector-Emitter-Strecke des Transistors an. Hand in Hand damit nimmt seine Collector-Emitter-Spannung zu. Wenn diese Spannung bis auf die Summe aus der Hilfsspannung und der Schleusenspannung der Diode D_1 angestiegen ist, geht die Diode aus ihrem Sperrzustand in den Durchlaßzustand über. Die Magnetwicklung liegt dann nurmehr an der Speisespannung.
Der Transistor wird nun gesperrt, weil seine Basis mit dem Kondensator C_1 von dem positiven Pol der Speisespannung abgetrennt ist.

Bedeutung des Widerstandes R_2

Dieser Widerstand ermöglicht das Entladen des Kondensators C_1 beim Umlegen des Schalters in die »aus«-Stellung. In dieser Stellung ergibt sich der Entladestromweg über den Schalter sowie über die Widerstände R_1 und R_2. Die Basis-Emitter-Strecke des Transistors kommt für den Entladestrom nicht in Betracht.

Wichtigstes über das Einschalten von Elektromagneten

- Ein Elektromagnet braucht zum Anziehen seines Ankers einen weit höheren Strom als zum Halten des angezogenen Ankers.
- Der die Elektromagnet-Wicklung durchfließende Strom steigt gemeinsam mit dem Aufbau des zu ihm gehörenden Magnetfeldes nach dem Einschalten des Stromes von Null aus an.
- Der Anstieg des Stromes und der Aufbau des Magnetfeldes erfolgen umso rascher, je höher die den Stromanstieg bewirkende Spannung ist.
- Man kann einen Transistor vorübergehend durchschalten, indem man seine Basis über die Reihenschaltung eines Widerstandes und eines Kondensators an den seinem Collector zugeordneten Pol der Speisespannung legt.
- Der Kondensator wird dabei unter Wirkung der Speisespannung über den Widerstand vom Basisstrom des Transistors aufgeladen.
- Mit dem Fortschreiten der Kondensator-Aufladung nimmt der Basisstrom ab, weshalb der Widerstand der Collector-Emitter-Strecke des Transistors ansteigt.
- So kommt es zum Sperren des Transistors.

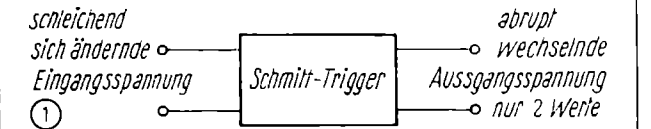
npn-Transistoren im Schmitt-Trigger

Der Schmitt-Trigger

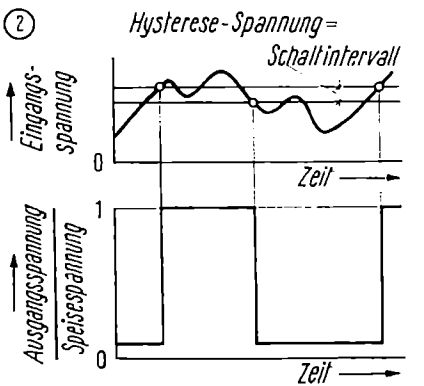
Ein **Trigger** ist eine bistabile Kippschaltung, die mit Hilfe eines Eingangsspannungs-Impulses aus ihrem einen Zustand in ihren anderen Zustand gekippt wird und diesen Zustand beibehält, bis ein weiterer Eingangsspannungs-Impuls einen neuerlichen Zustandswechsel bewirkt. **Bistabil** heißt eine Schaltung mit zwei stabilen Zuständen zumindest ihres Ausganges.

Unter einem Schmitt-Trigger versteht man ebenfalls eine in gewissem Sinn bistabile Kippschaltung. Deren beide mögliche Zustände sind aber zwei Wertebereichen der Eingangsspannung zugeordnet: Ein jeder dieser Zustände besteht solange, als der Wert der Eingangsspannung in dem hierfür geltenden Bereich liegt **(Bild 1)**.

Genau genommen ist somit die als Schmitt-Trigger bezeichnete Schaltung gar kein Trigger. In USA wird diese Schaltung deshalb statt Schmitt-Trigger »Schmitt-Limiter«, d. h. »**Schmitt-Begrenzer**« genannt. Wir bleiben hier bei »Schmitt-Trigger«, weil dies die bei uns übliche Bezeichnung ist.



Funktionsprinzip des Schmitt-Triggers. Als Ausgangsspannung ist jeweils einer von zwei festliegenden Werten möglich.



Die Ausgangsspannung wechselt ihren Wert beim Überschreiten eines oberen Grenzwertes der Eingangsspannung und beim Unterschreiten eines unteren Grenzwertes dieser Spannung.

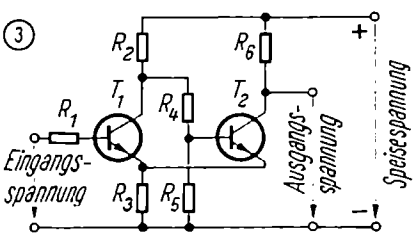
Der Zustand des Schmitt-Triggers wechselt — dem vorstehenden gemäß — im einen Sinn, wenn die Eingangsspannung einen gewissen Wert übersteigt, und wechselt im entgegengesetzten Sinn, wenn die Eingangsspannung einen zweiten Wert unterschreitet. Im Extremfall stimmen diese beiden Grenzwerte überein. In Wirklichkeit liegt stets der Grenzwert, dessen **Über**schreiten den einen Wechsel verursacht, **höher** als der Grenzwert, dessen **Unter**schreiten den entgegengesetzten Wechsel bewirkt.
Bild 2 gibt hierzu ein Beispiel. Den eben erwähnten Unterschied zwischen beiden Grenzwerten bezeichnet man als **Schaltintervall** oder als **Hysteresewert.**

Grundsätzlicher Aufbau eines Schmitt-Triggers

Ein Schmitt-Trigger ist eine Kippschaltung, die früher mit zwei Röhren bestückt war und heute statt dessen zwei Transistoren enthält. Damit die Schaltung kippt, müssen die die zwei Transistoren enthaltenden Stufen miteinander rückgekoppelt sein. Das heißt, der Ausgang einer jeden der beiden Stufen muß auf den Eingang der anderen Stufe einwirken.
Mit diesem Einwirken wird bezweckt, daß beim Anbahnen eines Zustandwechsels der Schaltung jede der zwei Stufen die andere Stufe in dem Wechsel ihres Zustandes unterstützt.
Im üblichen Transistor-Schmitt-Trigger werden die zwei Kopplungen mit einem Widerstand zwischen dem Collector des einen Transistors und der Basis des anderen Transistors sowie mit einem für beide Transistoren gemeinsamen Emitterwiderstand erreicht. Anstelle des gemeinsamen Emitterwiderstandes trifft man gelegentlich eine in Durchlaßrichtung gepolte Silizium-Diode an.

Die Arbeitsweise eines Schmitt-Triggers

Bild 3 zeigt eine Schmitt-Trigger-Schaltung. In dem dem unteren Eingangsspannungsbereich zugeordneten Zustand sind der Transistor T_1 zunächst gesperrt und der Transistor T_2 durchgeschaltet. Dabei stimmt die



Eine mit zwei npn-Transistoren bestückte Schmitt-Trigger-Schaltung. Das besondere Kennzeichen dieser Schaltung ist der den beiden Transistoren gemeinsame Emitter-Vorwiderstand R_3.

Ausgangsspannung der Schaltung mit der Summe der Spannung am Widerstand R_3 und der Collector-Emitter-Restspannung des Transistors T_2 überein. Die Spannung am Widerstand R_3 ist in diesem Fall mit dem Bruchteil $R_3 : (R_3 + R_6)$ der um die eben erwähnte Restspannung verminderten Speisespannung gegeben. Überschreitet die Eingangsspannung die Summe aus der Spannung am Widerstand R_3 und der Schleusenspannung der Basis-Emitter-Strecke des Transistors T_1, so ist damit der Übergang in den zum oberen Eingangsspannungsbereich gehörenden Zustand der Schaltung eingeleitet:

Jetzt setzt ein die Collector-Emitter-Strecke des Transistors T_1 durchfließender Strom ein. Dieser Strom geht (zusätzlich) durch den Widerstand R_2. Deshalb entfällt nun auf den Widerstand R_2 ein höherer Anteil der Speisespannung als zuvor. Daher sinkt die Spannung der Basis des Transistors T_2 gegen den Minuspol.

Der den Transistor T_2 durchfließende Strom wird somit gedrosselt. Das vermindert die Spannung am Widerstand R_3. Dies wiederum beschleunigt den Anstieg des durch den Transistor T_1 gehenden Stromes.

All das wirkt so zusammen, daß der Wechsel zwischen den Zuständen beider Transistoren sprunghaft, das heißt als ein Kippen, vonstatten geht.

Als Ergebnis des Kippens befinden sich der Transistor T_1 im Durchlaßzustand und der Transistor T_2 im Sperrzustand.

Die Ausgangs-(Leerlauf-)Spannung stimmt jetzt mit der Speisespannung überein. Wird der Ausgang belastet, so wirkt der Collectorwiderstand R_6 des Transistors T_2 als Ausgangswiderstand.

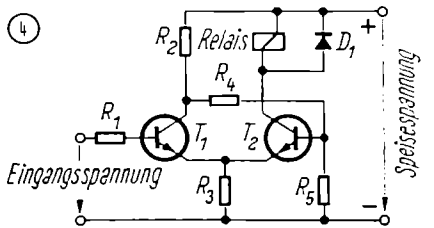
Der dem oberen Eingangsspannungsbereich entsprechende Zustand der Schaltung ist, wie vorstehend erläutert, mit stromführendem Transistor T_1 und gesperrtem Transistor T_2 gegeben. Er bleibt erhalten bis die Eingangsspannung um das Schaltintervall unter den das erste Kippen veranlassenden Wert abgesunken ist. Hierbei wird der den Transistor T_1 durchfließende Strom gedrosselt, womit das Zurückkippen der Schaltung in den Anfangszustand eingeleitet ist.

Vorwiderstand vor der Basis des Eingangstransistors

Bei Gleichheit der Widerstandswerte von R_2 und R_6 erreicht man mit dem Vorwiderstand $R_1 = 0\ \Omega$ ein Schaltintervall von etwa 0,6 V. Mit einem höheren Wert von R_1 wird das Schaltintervall verringert. Zu hoch darf man den Wert von R_1 (worin übrigens auch der Ausgangswiderstand der steuernden Quelle enthalten ist) nicht bemessen, weil die Schaltung dann nicht mehr kippt.

Wählt man für den Widerstand R_6 einen geringeren Wert als für den Widerstand R_2, so fällt das Schaltintervall größer aus.

Ein Schmitt-Trigger-Schaltplan wie man ihn häufig aufzeichnet. Hier betätigt die Endstufe ein elektromagnetisches Relais.



Eine zweite solche Schaltung

Bild 4 zeigt den Schaltplan. In diesem Bild sind die mit Bild 3 übereinstimmenden Bauelemente gleich bezeichnet. Der Schaltplan-Aufbau, wie er dem Bild 4 entspricht, wird für Schmitt-Trigger dem Schaltplan-Aufbau nach Bild 3 oft vorgezogen.

Während die Schaltung nach Bild 3 zum Steuern einer daran angehängten Schaltung dient, ist die Schaltung nach Bild 4 mit einem Relais ausgestattet. Dieses hat einen Wicklungswiderstand, der im allgemeinen niedriger ist als der Widerstandswert von R_6 in der Schaltung nach Bild 3. Daraus folgt ein größeres Schaltintervall. Man darf nämlich für den Widerstand R_2 keinen solch kleinen Wert wählen wie für den Widerstand der Relaiswicklung. Dies ist so begründet:

Der Transistor T_2 arbeitet als Schalter. Das heißt:

Entweder ist er gesperrt. Dabei tritt an ihm wohl ein größerer Teil der Speisespannung als Collector-Emitter-Spannung auf. Der Transistor wird jedoch währenddessen nur von dem sehr geringen Transistor-Reststrom durchflossen.

Oder er ist durchgeschaltet. In diesem Fall führt er zwar einen Strom, dessen Wert aus dem der Speisespannung und der Summe der Widerstandswerte der Relaiswicklung sowie des Widerstandes R_5 folgt. Hierbei herrscht aber an ihm nur seine niedrige Collector-Emitter-Restspannung.

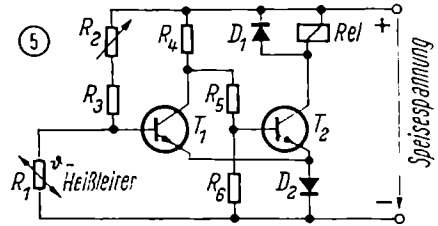
In beiden Fällen ist die mit dem Produkt aus Collectorstrom und Collector-Emitter-Spannung gegebene Verlustleistung gering.

Der Transistor T_1 wird hingegen möglicherweise auch als Verstärker betrieben. Dazu ergibt sich — wieder als Produkt aus Collectorstrom und Collector-Emitter-Spannung — eine manchmal zu beachtende Verlustleistung. Diese fällt umso höher aus, je geringer der Widerstandswert von R_2 ist.

Schmitt-Trigger in einem Temperatur-Relais

Bild 5 betrifft einen Temperaturregler. Als Temperaturfühler dient ein Heißleiter. Die an diesem auftretende Spannung stellt die Trigger-Eingangsspannung dar.

Sie ist am Widerstand R_2 einstellbar. Das Schaltinter-



Ein Schmitt-Trigger als Temperatur-Relais verwendet. Ein Heißleiter dient als Temperaturfühler. Anstelle des gemeinsamen Emitter-Vorwiderstandes ist hier eine Diode vorgesehen.

vall fällt hier trotz der erheblichen Ungleichheit der Widerstandswerte des Widerstandes R_1 und der Relaiswicklung klein aus, da in dieser Schaltung eine Silizium-Diode die Rolle des den beiden Transistoren gemeinsamen Emitterwiderstandes übernimmt. Die Durchlaßspannung einer Diode hängt nämlich von dem die Diode durchfließenden Strom nur wenig ab.
Die Diode D_1 ist eine Freilaufdiode. Sie verhindert das Auftreten von Abschaltüberspannungen an der Relaiswicklung.

Die Funktion der Schaltung

Diese Schaltung arbeitet so: Bei niedriger Temperatur ist der Heißleiter-Widerstand hoch. Das bedeutet für den Transistor T_1 eine Basis-Emitter-Spannung, die ihn durchschaltet.
Dabei erhält der Transistor T_2 als Basis-Emitter-Spannung den Überschuß der an dem Widerstand R_6 auftretenden Teilspannung über die Dioden-Durchlaßspannung. Dieser Spannungsüberschuß ist Null oder gar negativ. Dies bedeutet für den Transistor T_2 den Sperrzustand.
Bei hoher Heißleiter-Temperatur sind der Transistor T_1 gesperrt und der Transistor T_2 durchgeschaltet.

Über die Werte der Bauelemente

Als Beispiele seien für die Schaltungen nach Bild 3 und Bild 5 Widerstandswerte für eine Speisespannung von 12 V angegeben:
Bild 3: R_1 einschließlich Widerstand der Signalquelle bis 15 kΩ, R_2 = 1 kΩ, R_3 = 100 Ω, R_4 = 22 kΩ, R_5 = 22 kΩ, R_6 = 1 kΩ.
Bild 5: R_1 (Kaltwiderstand) 500 Ω, R_2 = 5 kΩ linear, R_3 = 560 Ω, R_4 = 470 Ω, R_5 = 560 Ω, R_6 = 560 Ω, Relais 140 Ω.
Die angegebenen Widerstandswerte sind Normwerte. Die wichtigste der den Normwerten zugrunde liegenden **Normreihen** ist gegeben mit den Zahlen:

1 1,2 1,5 1,8 2,2 2,7 3,3 3,9 4,7 5,6 6,8 8,2

Wichtigstes über Schmitt-Trigger

- Der Schmitt-Trigger ist eine Kippschaltung, deren zwei mögliche Zustände einem unteren und einem oberen Bereich der Eingangsspannung zugeordnet sind.
- Eine Kippschaltung ist eine Schaltung, die zwei Zustände annehmen kann, wobei der Zustandswechsel sprunghaft, d. h. als Kippen stattfindet.
- Zu jedem der beiden Zustände einer Kippschaltung gehören üblicherweise eine bestimmte Ausgangsspannung und ein bestimmter Wert des Ausgangswiderstandes dieser Schaltung.
- Beim Schmitt-Trigger findet der eine Zustandswechsel statt, wenn die Eingangsspannung die obere Grenze eines unteren Bereiches überschreitet.
- Der andere Zustandswechsel ergibt sich, wenn die Eingangsspannung die untere Grenze eines oberen Bereiches passiert.
- Die obere Grenze des unteren Bereiches liegt dabei höher als die untere Grenze des oberen Bereichs. Die beiden Bereiche überlappen sich hiermit.
- Der den beiden Bereichen gemeinsame Abschnitt wird Schaltintervall oder Hysteresewert genannt.
- Um das Schaltintervall klein zu halten, bemißt man in Schmitt-Triggern, die nur als Quellen von zwei Werten einer Signalspannung dienen, die beiden Collector-Widerstände gleich.
- Das Schaltintervall kann man zusätzlich vermindern, indem man für die Summe des Ausgangswiderstandes der steuernden Schaltung und des Basis-Vorwiderstandes des Eingangstransistors einen höheren Widerstandswert wählt.
- Ein zu hoher Wert dieses Widerstandes verhindert jedoch das Kippen der Schaltung.
- Manchmal muß man für die zwei Collectorwiderstände einander ungleiche Widerstandswerte in Kauf nehmen. Das ist der Fall, wenn anstelle des Collectorwiderstandes des zweiten Transistors ein Relais tritt. Hierbei kann man das Schaltintervall klein halten, indem man statt eines gemeinsamen Emitterwiderstandes eine in Durchlaßrichtung gepolte Silizium-Diode einsetzt.

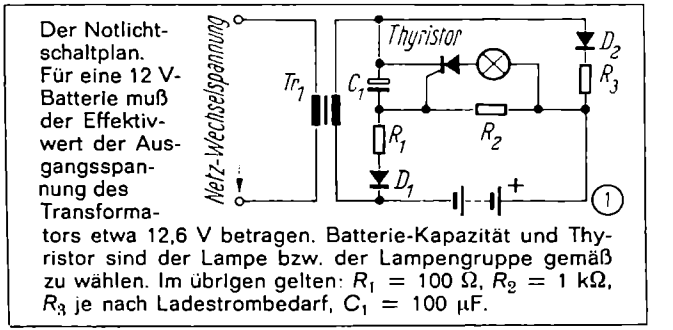
Thyristor als Notlichtschalter

Der Thyristor

Ein Thyristor gibt den Stromdurchgang — von seiner Anode (im Schaltzeichen ein Dreieck) nach seiner Katode (im Schaltzeichen ein Querstrich) — erst frei, wenn an seinem Starter gegen die Katode eine Spannung von einigen Volt wirkt, die einen positiven Starterstrom veranlaßt.
In USA wird der Thyristor SCR genannt. **SCR** ist die Abkürzung von silicon controlled rectifier, was frei übersetzt »steuerbares Siliziumventil« bedeutet.

Der Notlichtschalter

Die so bezeichnete Schaltung soll bei Wegbleiben der Netzspannung eine Notbeleuchtung automatisch einschalten, die in Betrieb bleibt, solange die Netzspannung ausgefallen ist.
Das Notlicht besteht üblicherweise aus einer batteriegespeisten Glühlampe bzw. Glühlampen-Gruppe. Die Akkumulator-Batterie wird, solange die Netzspannung nicht ausgefallen ist, auf dem Zustand voller Ladung gehalten bzw. wenn das notwendig wird, automatisch nachgeladen oder neu geladen.



Der Notlichtschaltplan. Für eine 12 V-Batterie muß der Effektivwert der Ausgangsspannung des Transformators etwa 12,6 V betragen. Batterie-Kapazität und Thyristor sind der Lampe bzw. der Lampengruppe gemäß zu wählen. Im übrigen gelten: $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 1\ k\Omega$, R_3 je nach Ladestrombedarf, $C_1 = 100\ \mu F$.

Die Schaltung

Die Schaltung (**Bild 1**) liegt über einen Transformator an der Netzwechselspannung. Der Transformator hat die Aufgabe, die Wechselspannung herabzusetzen sowie eine leitende Verbindung zwischen Netz und Notlichtstromkreis zu vermeiden.
Der Notlichtstromkreis wird, wie üblich, aus einer Akkumulator-Batterie gespeist und hier mit einem Thyristor geschaltet. Zum Nachladen des Akkumulators gehört im Notlicht-Stromkreis eine Gleichrichterschaltung.

Die Funktion

Der Widerstand R_2 hat einen hohen Wert. Der ihn durchfließende Strom darf daher außer Acht bleiben.

Solange die Netzwechselspannung nicht ausgefallen ist, liegt die aus C_1, R_1 und D_1 bestehende Reihenschaltung an der Ausgangs-Wechselspannung des Netztransformators. Auf Grund der Wechselspannung und der Ventilwirkung der Diode D_1 wird der Kondensator C_1 aufgeladen. Dabei nimmt der im Schaltplan unten eingetragene Kondensator-Belag gegen den anderen Belag eine negative Spannung an. Diese sperrt als negative Starter-Katoden-Spannung den Thyristor.

An der Ausgangs-Wechselspannung des Transformators liegt außerdem die Reihenschaltung der Diode D_2 mit dem Widerstand R_3 und der Batterie. Hiermit ist für die Batterie der Ladestromkreis gegeben.

Fällt die Netzwechselspannung aus, so entlädt sich der Kondensator C_1 über D_2, R_3 und R_2. Damit wird der Weg frei für den positiven Starter-Katoden-Strom des Thyristors. Dieser Strom geht vom Pluspol der Batterie über R_2 zum Starter und von der Katode des Thyristors über die Transformator-Ausgangswicklung zum Minuspol der Batterie. Die Thyristor-Anode ist über die Lampe bzw. Lampengruppe mit dem Pluspol der Batterie verbunden. Die Thyristor-Katode liegt über die Transformator-Ausgangswicklung am Minuspol der Batterie. Der Thyristor hat somit die Batteriespannung als positive Anoden-Katoden-Spannung. Folglich leitet die positive Starter-Katoden-Spannung den Stromdurchgang durch den Thyristor und damit durch die Lampe ein.

Nach Wiederkehr der Netz-Wechselspannung wird der Kondensator C_1 von neuem in der Weise aufgeladen, wie das eingangs erwähnt ist. So entsteht wieder die schon erwähnte negative Starter-Katoden-Spannung. Außerdem ergibt sich mit dem aufgeladenen Kondensator für die Thyristor-Katode gegen die Thyristor-Anode eine zusätzliche positive Spannung. Diese wirkt am Thyristor der Batteriespannung entgegen. Daher senkt sie den Anoden-Katoden-Strom des Thyristors unter dessen Haltewert ab. Hiermit ist die Lampe ausgeschaltet. Anschließend wird die Batterie über die Reihenschaltung der Diode D_2 mit dem Widerstand R_3 automatisch nachgeladen.

Wichtigstes im Zusammenhang mit der hier behandelten Schaltung

- Ein Thyristor ist als Gleichstromschalter vor allem da von Vorteil, wo es keine besonderen zusätzlichen Schaltungen erfordert um den Thyristor aus seinem Durchlaßzustand in den Sperrzustand zurückzukippen.
- Günstig ist, falls ein Ausbleiben einer Wechselspannung den Durchlaßzustand des Thyristors und deren Wiederauftreten dessen Sperrzustand bewirken.
- Zu diesem Zweck muß aus der Wechselspannung eine Gleichspannung abgeleitet werden.
- Die Gleichspannung ist bei Halbweg-Gleichrichtung (im Leerlauf) nahezu das 1,4fache des Wechselspannungs-Effektivwertes.

Glimmthyratron in Dämmerungsschalter

Das Schaltzeichen des Glimm-Thyratrons. Dessen System besteht aus einer Anode, einer Hauptkatode, einem Steuergitter und einer Hilfskatode.

Das Glimmthyratron

Das ist eine als elektronischer Schalter dienende Glimmröhre mit einer Anode, einer Hauptkatode, einer Steuerelektrode und einer Hilfskatode (**Bild 1**). Als Schaltstrecke dient die Anoden-Hauptkatoden-Strecke des Glimmthyratrons.

Zwischen der Hilfskatode und der **Hauptkatode** wird ein schwacher Glimmstrom aufrechterhalten. Ihn erreicht man mit einer negativen Gleichspannung der **Hilfskatode** gegen die Hauptkatode. Für den zwischen den zwei Katoden zustande kommenden Glimmstrom ist die Hauptkatode eine Anode. Mit dem Glimmstrom sind in der Umgebung beider Katoden frei bewegliche Ladungsträger (Ionen und Elektronen) vorhanden.

Ein Übergang dieser Ladungsträger zwischen den beiden Katoden einerseits und der Anode anderseits wird mit einer negativen Spannung der Steuerelektrode gegen die Katode (von zumindest 6 V) sicher verhindert und mit einer negativen Spannung von höchstens 0,5 V sicher freigegeben. Die Steuerelektrode des Glimmthyratrons wird auch **Steuergitter** genannt.

Der einmal erreichte Durchlaßzustand kann mit der Steuerelektrode nicht beendet werden. Er bleibt bestehen, bis der Anodenstrom (außerhalb der Röhre) unterbrochen oder die Anoden-Hauptkatoden-Spannung unter ihren Brennwert abgesenkt werden.

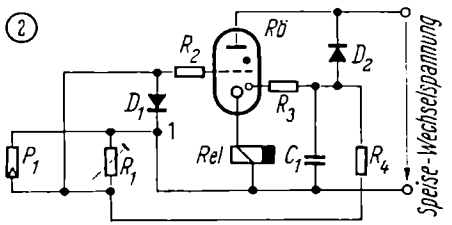
Dämmerungsschalter

Hierunter versteht man eine Schaltung, die — beeinflußt von sich langsam ändernder Licht-Einstrahlung — bei einer bestimmten Beleuchtungsstärke zum Beispiel einen Kontakt betätigt und bei einer davon um ein festgelegtes Schaltintervall abweichenden Beleuchtungsstärke den vorhergehenden Kontaktzustand wiederherstellt.

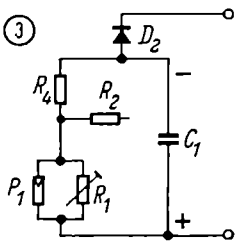
Die Schaltung

Bild 2 zeigt eine derartige Schaltung. Als Lichtfühler dient eine Photodiode P_1. Die Anoden-Hauptkatoden-Strecke des Glimmthyratrons liegt in Reihe mit der Relaiswicklung an der Netz-Wechselspannung. Mit der Halbweg-Gleichrichterschaltung, die die Diode D_2 und den Ladekondensator C_1 enthält, wird eine Hilfs-Gleichspannung gewonnen. Diese dient für die Hilfskatoden-Hauptkatoden-Strecke als negative Speisespannung und zusätzlich als Gesamtspannung für den aus dem Widerstand R_4 sowie der Parallelschaltung der Photodiode P_1 mit dem Abgleichwiderstand R_1 bestehenden Spannungsteiler **(Bild 3)**.

Die Widerstände R_2 und R_3 sind die für Glimmstrecken notwendigen, die Glimmströme begrenzenden Vorwiderstände. Die Diode D_1 dient als Schutz für die Steuer-Elektrode (höchstzulässiger negativer Wert der Steuerspannung etwa 50 V).



Lichtrelais mit Photodiode als Lichtfühler und Glimm-Thyratron als Schaltverstärker. Dimensionierungs-Hinweise: R_1 = 1 MΩ linear, R_2 = 220 kΩ, R_3 = 1,2 MΩ, R_4 = 6,8 MΩ, C_1 = 220 nF, Rö = Cerberus GT 21 Rel etwa 2 kΩ, D_1 100 V, D_2 700 V.



Hier ist der Eingangs-Spannungsteiler der Schaltung nach Bild 2 so dargestellt, daß man die dafür geltenden Zusammenhänge klar überblicken kann. Die Diode D_1 ist der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Wenn die Photodiode beleuchtet wird, sinkt ihr Widerstand und damit der Betrag der negativen Spannung an der Parallelschaltung von P_1 mit R_1.

Funktion der Schaltung

Mit Zunahme der die Photodiode beeinflussenden Beleuchtungsstärke sinkt deren Sperrwiderstandswert. Aufgrund dessen nimmt der Betrag der negativen Steuerelektroden-Hauptkatoden-Spannung ab. Bei einer bestimmten, am Widerstand R_1 einstellbaren Beleuchtungsstärke wird das Glimmthyratron auf diese Weise in den Durchlaßzustand gekippt. Das geschieht dann fortlaufend, wenn die Wechselspannung der Anode gegen die Hauptkatode jeweils einen dazu erforderlichen positiven Mindest-Augenblickswert erreicht hat. So kommt es während jeder positiven Halbwelle

der Netz-Wechselspannung zu einem Stromimpuls, der die Relaiswicklung durchfließt.
Damit der Relaisanker zwischen zwei Stromimpulsen nicht abfällt, und auch aufgrund der impulsweisen Relais-Erregung nicht ins Schwirren gerät, verwendet man hier ein **Relais mit Kurzschlußwicklung.**
Diese **Kurzschlußwicklung** verzögert den Magnetfeld-Abbau: Wenn der Relais-Erregerstrom unterbrochen wird, kann der zu dem nun abklingenden Magnetfeld erforderliche Strom in der Kurzschlußwicklung fließen. Hierbei unterbleibt beim Unterbrechen des Relais-Erregerstromes eine höhere Überspannung an der Relaiswicklung. Das Magnetfeld baut sich nur mit der Geschwindigkeit ab, die aus den in der Kurzschlußwicklung aufgrund des Stromdurchganges auftretenden Verlusten folgt.
In den Impulspausen sinkt die Spannung an der Relaiswicklung wegen der während dieser Zeitspannen allmählichen Abnahme des Magnetfeldwertes noch nicht völlig auf Null ab. Eine Restspannung an der Relaiswicklung bedeutet eine negative Spannung der Hauptkatode gegen den Punkt 1 der Schaltung und deshalb einen verminderten Betrag der negativen Spannung der Steuerelektrode gegen die Hauptkatode. Hieraus folgt: Die Stromimpulse setzen beim Rückgang der Beleuchtungsstärke nicht bereits bei dem Wert aus, bei dem sie begannen, sondern erst bei einer (um das Schaltintervall) abgesunkenen Beleuchtungsstärke.

Wichtigstes über Glimmthyratrons

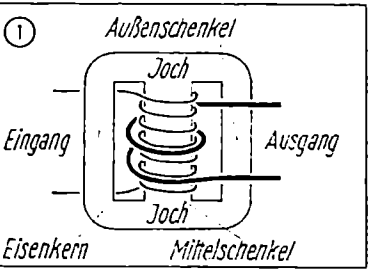
- Das Glimm-Thyratron ist ein elektronischer Schalter, der meistens in Reihe mit einer Relaiswicklung (deren Strom er schaltet) an der Netzwechselspannung (220 V) betrieben wird.
- Das Glimm-Thyratron benötigt eine Hilfs-Gleichspannung, die zwischen seiner Hilfskatode und seiner Hauptkatode einen Glimmstrom (etwa 0,2 mA) bewirkt.
- Diese Hilfsspannung gewinnt man aus der Netzwechselspannung in einer einfachen Halbweg-Gleichrichterschaltung, die lediglich eine Diode und einen Ladekondensator umfaßt.
- Die Steuerelektrode (das Steuergitter) sperrt mit einer gegen die Hauptkatode negativen Spannung von wenigstens 6 V den Stromdurchgang zwischen Anode und Hauptkatode.
- Die Steuerelektrode gibt den Stromdurchgang frei, wenn der Betrag der negativen Steuerelektroden-Katoden-Spannung auf etwa 0,5 V abgesunken ist.
- Das Glimm-Thyratron kommt daher mit geringeren Steuerspannungen aus als die sonstigen Glimm-Relaisröhren.
- Das Glimm-Thyratron eignet sich als elektronischer Schalter für elektromagnetische Relais bei Relaisströmen zwischen 10 mA und 40 mA besonders, wenn ein Betrieb aus dem Wechselstromnetz in Frage kommt und nur geringe Steuerspannungen verfügbar sind.

Transformator in Wechselstrom-Netzteil

Ein Transformator

So bezeichnet man ein im wesentlichen aus Wicklungen bestehendes Bauelement, mit dem man zwischen einer verfügbaren Wechselspannung und einem Verbraucher, der eine Wechselspannung derselben Frequenz aber mit anderem Wert benötigt, vermitteln kann.
Ein solches Bauelement überträgt die zur Verfügung stehende (die speisende) Wechselspannung von einem Wicklungsteil auf einen anderen Wicklungsteil mit geändertem Wert.
In dem am leichtesten zu übersehenden Fall handelt es sich lediglich um zwei Wicklungsteile, die als gesonderte, miteinander nicht verbundene Wicklungen ausgeführt sind.
An die eine der beiden Wicklungen (die **Eingangswicklung)** wird die zur Verfügung stehende Speise-Wechselspannung gelegt.
An die andere Wicklung (die **Ausgangswicklung)** schließt man den Verbraucher (die Last) an.

Dabei wird über den Transformator aus einem Wechselstromkreis in einen anderen Wechselstromkreis elektrische Leistung übertragen, ohne daß zwischen diesen Stromkreisen elektrisch leitende Verbindungen notwendig sind.
Das Übertragen der elektrischen Leistung von der Eingangswicklung auf die Ausgangswicklung erfolgt mit Hilfe eines magnetischen Wechselfeldes. Dieses Wechselfeld entsteht aufgrund des Anschlusses der Transformator-Eingangswicklung an die Speise-Wechselspannung.
Unter sonst gleichen Bedingungen muß das Wechselfeld einen umso höheren Scheitelwert haben, je tiefer die Frequenz der Speise-Wechselspannung ist. Für die relativ niedrige Netzfrequenz hat man es daher mit hohen Magnetfeld-Scheitelwerten zu tun. Um solche Wechselfelder rationell zustande bringen zu können, muß man dem Wechselfeld einen in sich geschlossenen



Schematische Darstellung eines Transformators mit einem Eisenkern dessen Mittelschenkel von den beiden Wicklungen gemeinsam umschlossen wird.

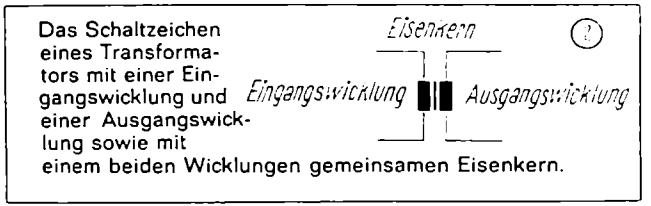
zumindest weitgehend bequemen Weg bieten. Das geschieht, indem man die Wicklungen mit einem gemeinsamen **Eisenkern** verkettet **(Bild 1)**.

Wechselstrom-Netzteil

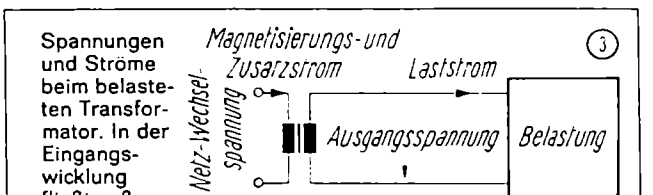
Das ist ein Geräteteil, der zwischen das Wechselstromnetz und das übrige Gerät, das nicht mit der Netz-Wechselspannung gespeist werden kann, eingefügt werden muß. Manchmal besteht der Wechselstrom-Netzteil nur aus einem Netztransformator. Oft aber fehlt der Netztransformator, wobei sich der Netzteil auf einen Netz-Gleichrichter beschränkt, in dem aus der Netzwechselspannung eine Gleichspannung gewonnen wird. Häufig umfaßt der Wechselstrom-Netzteil einen Netztransformator und wenigstens eine an seinen Ausgang oder an einen seiner Ausgänge angeschlossene Gleichrichterschaltung.

Das Netztransformator-Schaltzeichen

Im Transformator-Schaltzeichen **(Bild 2)** bedeuten die beiden schwarzen Rechtecke die zwei Wicklungen und der dazwischen eingetragene Strich den Eisenkern des Transformators. Die eine Wicklung (die Eingangswicklung, die hier auch **Netzwicklung** heißt) liegt an der Netz-Wechselspannung. An die andere Wicklung (Ausgangswicklung) ist die Last (Belastung) angeschlossen,



Das Schaltzeichen eines Transformators mit einer Eingangswicklung und einer Ausgangswicklung sowie mit einem beiden Wicklungen gemeinsamen Eisenkern.



Spannungen und Ströme beim belasteten Transformator. In der Eingangswicklung fließt außer dem Magnetisierungsstrom, der auch bei fehlender Belastung zustande kommt, der Zusatzstrom der die magnetisierende Wirkung des Transformator-Ausgangsstromes auf den Eisenkern aufhebt.

die z. B. aus einem Gleichrichterteil und der über ihn gespeisten eigentlichen Last besteht.
Statt Eingangswicklung sagt man auch **Primärwicklung** und statt Ausgangswicklung dementsprechend **Sekundärwicklung.**

Betrachtete Schaltung

Das **Bild 3** zeigt den Schaltplan einer Netzanschlußschaltung, in der sich der Netzteil auf den Netztransfor-

mator beschränkt. Die Belastung ist hier der Geräteteil, der über den Netztransformator aus dem Wechselstromnetz gespeist wird. Der Netztransformator wandelt die Netzspannung auf den Wert, den dieser Gerateteil als Speisespannung erfordert. Dabei ergibt sich mit einem Transformator, dessen Ein- und Ausgangswicklung elektrisch voneinander getrennt sind, die Möglichkeit den so gespeisten Geräteteil an einem dafür passenden Punkt zu erden, ohne daß auf das Vorhandensein einer Erdung im Netz Rücksicht genommen zu werden braucht.

Der noch nicht belastete Netztransformator

Der Laststromkreis sei zunächst noch unterbrochen. Infolgedessen ist die Ausgangswicklung stromlos. Dennoch fließt in der Eingangswicklung, die an der Netzwechselspannung liegt, ein Wechselstrom. Dieser bewirkt im Transformator-Eisenkern das schon erwähnte magnetische Wechselfeld.
Dieses magnetische Wechselfeld ruft in jeder Windung der Netzwicklung eine Wechselspannung hervor. Die Summe aller dieser Windungsspannungen wirkt der angelegten Netzwechselspannung so entgegen, daß bei offener Ausgangswicklung nur der Magnetisierungs-Wechselstrom zustande kommen kann. Der **Magnetisierungs-Wechselstrom** ist der das Transformator-Wechselfeld bewirkende Transformator-**Leerlaufstrom,** d. h. der Strom, der die Transformator-Eingangswicklung auch bei unterbrochenem Ausgangs-Stromkreis durchfließt.
Man sorgt für einen niedrigen Wert des Magnetisierungsstromes, indem man für den Transformator einen gut in sich geschlossenen Eisenkern mit ausreichendem Eisenquerschnitt verwendet und eine hohe Eingangswindungszahl wählt:
Der Magnetisierungs-Wechselstrom, der in der Eingangswicklung bei stromloser Ausgangswicklung allein fließt, nimmt einen um so geringeren Wert an, je größer der Eisenquerschnitt, je besser geeignet das Eisenmaterial, je kürzer die Eisenweglänge, je weniger störend die Stoßfugen im Eisenweg und je größer die Windungszahl der Eingangswicklung des Transformators sind.
Unter einer **Stoßfuge** versteht man jede Stelle, an der im Eisenkern eine Unterbrechung vorhanden ist, die von dem Magnetfeld des Eisenkerns durchdrungen werden muß (siehe die Bilder 4 ... 6).
Eisenkern und Wicklungen sind in einem Transformator derart ausgebildet, und angeordnet, daß sie sich gegenseitig wie Kettenglieder umschließen (siehe Bild 1). Daher durchsetzt das vom Magnetisierungs-Wechselstrom herrührende magnetische Wechselfeld nicht nur jede Windung der Eingangswicklung, sondern auch jede Windung der Ausgangswicklung.

Die auf eine einzige Windung entfallende Teilspannung nennt man **Windungsspannung.**
Es entsteht an der Ausgangswicklung also eine Wechselspannung, die mit dem Produkt aus der Windungsspannung und der Ausgangs-Windungszahl gegeben ist. Hiermit hat die am Transformator-Ausgang verfügbare Spannung nahezu den Wert, der sich ergibt, wenn man die als Transformator-Eingangsspannung auftretende Netzspannung mit dem Verhältnis der Ausgangs-Windungszahl zur Eingangs-Windungszahl vervielfacht. Das nennt man **Spannungs-Übersetzung.**

Der belastete Netztransformator

Wird an die Transformator-Ausgangswicklung eine Belastung (ein **Verbaucher**, eine **Last**) angeschlossen, so besteht damit ein Stromkreis, in dem unter der Wirkung der Transformator-Ausgangsspannung ein Wechselstrom fließt. Dieser Strom geht durch die Windungen der Transformator-Ausgangswicklung und umfließt so den Transformator-Eisenkern. Hiermit übt er auf den Eisenkern eine magnetisierende Wirkung aus.
Das magnetische Wechselfeld, das im Eisenkern besteht, darf aber seinen Wert nur wenig ändern: Die damit in der Eingangswicklung bewirkte Gegenspannung muß nämlich dort der Netzspannung nach wie vor das Gleichgewicht halten. Das bedeutet:
Sobald in der Ausgangswicklung ein Wechselstrom fließt, nimmt die Eingangswicklung aus dem Netz zusätzlich zum Magnetisierungsstrom einen Strom auf, der die magnetisierende bzw. die hier entmagnetisierende Wirkung des Ausgangswechselstromes ausgleicht.
Die magnetisierende oder entmagnetisierende Wirkung eines einen Eisenkern umfließenden Stromes entspricht dem Produkt aus dem Wert des Stromes und der Zahl der von diesem Strom durchflossenen Windungen. Hieraus folgt: Der Wert des in der Ausgangswicklung fließenden Laststromes verhält sich zu dem Wert des zusätzlich zum Magnetisierungsstrom in der Eingangswicklung fließenden Stromes, der die magnetisierende Wirkung des Ausgangsstromes kompensiert, wie die Eingangswindungszahl zur Ausgangswindungszahl.
Das heißt: Ausgangsstrom und hierzu gehörender in der Eingangswicklung zusätzlich zum Magnetisierungsstrom fließender Strom verhalten sich umgekehrt wie die Zahlen der von diesen Strömen durchflossenen Windungen. Dies wird als **Strom-Übersetzung** oder **Strom-Wandlung** bezeichnet.

Etwas über das Bemessen des Netztransformators

Die Eingangs-Windungszahl und der Eisenquerschnitt müssen umso größer gewählt werden, je höher die Netzspannung ist. Meistens handelt es sich bei der Netzspannung um 220 V.

Die Windungszahlen bemißt man umso geringer, je höher die über den Netztransformator zu übertragende Leistung sein soll. Zu weniger Windungen aber gehört, wie eben angedeutet, ein größerer Eisenquerschnitt. Die Leiterquerschnitte der beiden Wicklungen müssen natürlich den darin maximal fließenden Strömen entsprechen.

Vom Eisenkern

Die Eisenkerne der Netztransformatoren werden aus Blechen geschichtet. Folglich ist der Eisenquerschnitt unterteilt. Hiermit wird verhindert, daß im Eisenkern Ströme (ähnlich wie in einer in sich kurzgeschlossenen Ausgangswicklung) auftreten können. Der Eisenweg eines solchen Kerns muß irgendwie unterbrochen sein, damit man ihn mit der Wicklung bequem zusammenbauen kann. Die hierzu notwendigen Schnittstellen sind die bereits erwähnten Stoßfugen. Die Bleche, die den Eisenkern bilden, **schichtet** man meistens **wechselseitig.** Dabei werden die Stoßfugen einer Blechschicht von dem Blech der nächsten Blechschicht überdeckt.
In **gleichseitig geschichteten** Kernen liegen die Stoßfugen aller Blechlagen übereinander.
Je nach der Ausbildung des **Blechschnittes** unterscheidet man **M-Kerne (Bild 4), EI-Kerne (Bild 5)** und **P-Kerne (Zweischenkelkerne) (Bild 6).**

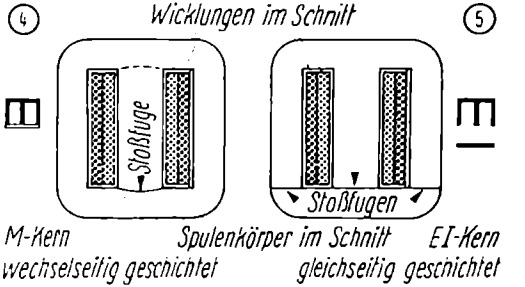
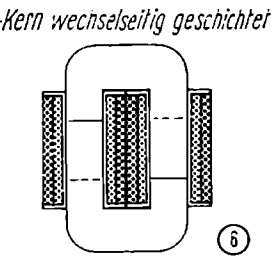


Bild 4: Ein Eisenkern aus M-Schnitt-Blechen, deren Stoßfugen sich überlappen, mit im Schnitt dargestellten Wicklungen, die den Mittelschenkel des Kerns umschließen.
Bild 5: Dieser Eisenkern besteht aus Blechen mit voneinander verschiedenem Schnitt: Jede Lage enthält ein Blech mit E-Schnitt und ein Blech mit I-Schnitt.
Bild 6: Dies ist ein Zweischenkelkern, wobei jede der zwei Windungen je zur Hälfte einen der beiden Schenkel umschließt. Der Blechschnitt hat L-Form. Die Stoßfugen überlappen sich.



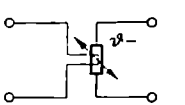
Die P-Kerne werden üblicherweise so bewickelt, daß jeder der beiden Schenkel von je einer Hälfte der Eingangs- und Ausgangswicklung umschlossen ist. Hierbei konzentriert sich das Magnetfeld besonders gut auf den

Eisenkern. Es »schließt« sich zum allergrößten Teil in dem Kern. Nur ein sehr kleiner Anteil des Magnetfeldes streut in die Umgebung des Eisenkernes aus. Das heißt: Die **magnetische Ausstreuung** ist bei einem Kern nach Bild 6 mit symmetrisch auf die beiden Kerne verteilten Wicklungen weit geringer als bei Kernen mit **Mittelschenkel** nach Bild 4 oder Bild 5.

Wichtigstes über Netztransformatoren

- Ein Netztransformator besteht aus einem in sich geschlossenen Eisenkern und zwei Wicklungen, die ihn gemeinsam umschließen.
- Die eine Wicklung wird an die Netzspannung gelegt. Sie heißt deshalb Netzwicklung oder Eingangswicklung oder Primärwicklung.
- Die andere Wicklung, an die die Belastung angeschlossen wird, ist die Lastwicklung, d. h. die Ausgangswicklung, die man auch Sekundärwicklung nennt.
- Liegt die Eingangswicklung an der Netzwechselspannung, so hat diese Wechselspannung in der Eingangswicklung (bei unterbrochenem Laststromkreis ausschließlich) einen Magnetisierungs-Wechselstrom zur Folge, der im Eisenkern ein magnetisches Wechselfeld hervorruft.
- Dieses Wechselfeld bewirkt in jeder Windung der Eingangswicklung eine Wechselspannung, die, weil sie auf eine Windung entfällt, Windungsspannung heißt.
- Die Summe dieser Windungsspannungen wirkt der angelegten Netzwechselspannung entgegen und begrenzt damit den Magnetisierungsstrom.
- Der Magnetisierungsstrom fällt um so schwächer aus, je größer der Querschnitt des Eisenkerns und die Eingangswindungszahl sind.
- Das magnetische Wechselfeld ruft in jeder Windung der Ausgangswicklung ebenso eine Wechselspannung hervor, wie in jeder Windung der Eingangswicklung.
- An der Ausgangswicklung ist demgemäß die Summe ihrer Windungsspannungen verfügbar.
- Hieraus folgt: Der Transformator übersetzt die Eingangswechselspannung so, daß am Ausgang die mit dem Verhältnis der Ausgangswindungszahl zur Eingangswindungszahl vervielfachte Spannung auftritt.
- Der in der Ausgangswicklung fließende Laststrom wirkt auf den Transformator-Eisenkern entmagnetisierend.
- Diese entmagnetisierende Wirkung wird (automatisch) mit einem in der Eingangswicklung des belasteten Transformators zusätzlich fließenden Strom kompensiert.
- Die magnetisierende Wirkung eines einen Eisenkern umfließenden Stromes ist mit dem Produkt aus dem Wert dieses Stromes und der Windungszahl gegeben.
- Daher findet im Transformator eine »Strom-Übersetzung« im umgekehrten Verhältnis der Windungszahlen statt.

Fremdgeheizte Heißleiter als ferngesteuerte Stellwiderstände



Schaltzeichen eines fremdgeheizten Heißleiters. Die links eingetragenen Anschlüsse gehören zur Heizwicklung. Die beiden anderen Anschlüsse sind die des Heißleiters selbst. Der Pfeil mit den beiden Spitzen deutet die Beeinflußbarkeit des Heißleiterwiderstandes an.

Heißleiter

Ein Heißleiter ist ein in der Elektronik viel benutztes Bauelement. Dessen Leitwert nimmt zu, wenn man seine Temperatur erhöht. Ein Heißleiter stellt demgemäß einen Widerstand dar, dessen Widerstandswert von der Temperatur stark beeinflußt werden kann.

Fremdgeheizte Heißleiter

Es ist im allgemeinen einfacher, die Temperatur eines Gegenstandes über die Temperatur seiner Umgebung zu erhöhen, als sie unter diese Temperatur abzusenken. Im Heißleiter nutzt man daher vielfach den den Heißleiter selbst durchfließenden Strom aus, um die Heißleitertemperatur über die Temperatur seiner Umgebung zu erhöhen.

Man kann aber einen Heißleiter auch damit erwärmen, daß man ihn mit einer Heizwicklung umschließt und durch diese Heizwicklung einen Strom fließen läßt. Eine derartige Anordnung ist mit einer nicht unerheblichen **Trägheit** behaftet. Das heißt:
Es dauert eine gewisse Zeit, bis sich eine Änderung des die Heizwicklung durchfließenden Stromes voll auf die Heißleiter-Temperatur und hiermit auf den Heißleiter-Leitwert ausgewirkt hat. Eine große derartige **Wärme-Trägheit** ist oft unerwünscht. Aus diesem Grund hat man fremdgeheizte Heißleiter entwickelt. Ein solches Bauelement enthält in einem kleinen Gehäuse einen Heißleiter und eine diesen Heißleiter dicht umschließende Heizwicklung, die gegen den Heißleiter elektrisch isoliert ist (**Bild 1**).
Hierin kann mit einer Heizstrom-Änderung von beispielsweise 5 mA auf 28 mA der Heißleiter-Leitwert auf mehr als das Hundertfache erhöht werden.

Vergleich mit einem Transistor

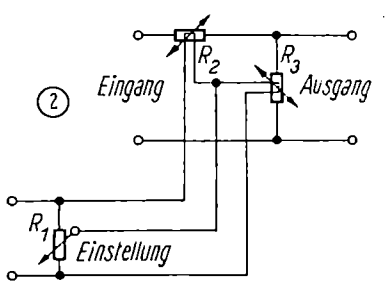
Im Transistor steuert man den Leitwert seiner Collector-Emitter-Strecke mittels des Basisstromes, den man mit der Basis-Emitter-Spannung bewirkt.
Im fremdgeheizten Heißleiter steuert man den Heißleiter-Leitwert mit dem die Heizwicklung durchfließenden Heizstrom, den man mit einer elektrischen Spannung verursacht.
Beim Transistor sind der Stromkreis, in dem der steuernde Basisstrom fließt, und der Stromkreis, der vom gesteuerten Strom durchflossen wird, miteinander elektrisch leitend verbunden: Diesen beiden Stromkreisen ist die Basis-Emitter-Strecke des Transistors gemeinsam.
Beim fremdgeheizten Heißleiter besteht zwischen dem Stromkreis, in dem der steuernde Strom (der Heizstrom) fließt, und dem Stromkreis für den gesteuerten Strom (dem Heißleiterstrom) keine elektrische Verbindung. Das muß als Vorteil gebucht werden. Zwischen Heißleiter und Heizwicklung sind im allgemeinen Spannungen bis zu etwa 40 V zulässig.

Fremdgeheizte Heißleiter können aber doch nur sehr selten an Stelle von Transistoren verwendet werden: Transistoren arbeiten mit nur sehr geringer Trägheit. Der Leitwert der Collector-Emitter-Strecke folgt fast unmittelbar den Änderungen des Basisstromes. Deshalb kann man Transistoren z. B. auch in Verstärkern für sehr hohe Frequenzen einsetzen.
Fremdgeheizte Heißleiter reagieren weit weniger schnell. Das sieht man aus den Datenlisten. Darin steht beispielsweise: **Abkühl-Zeitkonstante** 3 s. Das heißt: Schaltet man den Heizstrom ab, mit dem der Heißleiter-Leitwert erhöht wurde, so dauert es mehrere Sekunden, bis der Heißleiter den zur fehlenden Heizung gehörenden niedrigen Leitwert wieder einigermaßen angenommen hat. Ein zweiter sehr wesentlicher Unterschied zwischen einem Transistor und einem fremdgeheizten Heißleiter besteht bezüglich der zum Steuern benötigten elektrischen Leistung: Diese Steuerleistung ist für Transistoren im allgemeinen sehr klein. Für fremdgeheizte Heißleiter kommen im Vergleich hierzu sehr viel höhere Steuerleistungen in Betracht.

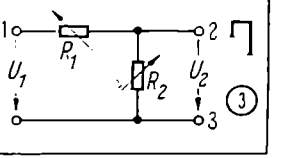
Fremdgeheizte Heißleiter zum Fernsteuern

Es gibt viele Fälle, in denen Verzögerungen von wenigen Sekunden nicht stören oder aus irgendwelchen Gründen sogar erwünscht sind und nennenswerte elektrische Leistungen für das Steuern zur Verfügung stehen. In solchen Fällen kommen fremdgeheizte Heißleiter als steuerbare Bauelemente in Betracht.
Beispielsweise ermöglichen sie es auf einfache Weise, in Schaltungen für höhere Frequenzen Widerstands- bzw. Leitwerte über größere Entfernungen zu ändern.

Zwischen dem Ort, an dem die Einstellungen vorgenommen werden, und dem Ort, an dem sie sich auswirken sollen, braucht man nur den Heizstrom für den Heißleiter fließen zu lassen.
Als solchen verwendet man Gleichstrom oder auch Netzwechselstrom. Hiermit umgeht man alle Schwierigkeiten, die sich aufgrund von Leitungskapazitäten und Störeinwirkungen ergeben könnten.
Zwischen dem Ort, an dem man einstellen will und dem Ort der Schaltung, die beeinflußt werden soll, genügen deshalb einfache Leitungen ohne jede Abschirmung. Das kann von besonderem Vorteil sein, wenn es sich um viele, über größere Entfernungen getrennt vorzunehmende Einstellungen handelt.



Aus zwei fremdgeheizten Heißleitern bestehender Spannungsteiler. Die Heizwicklungen der beiden Heißleiter sind an den Spannungsteiler angeschlossen, der zum Einstellen des Heizstromverhältnisses dient.



Die beiden Teile eines Spannungsteilers können als L-Glied aufgefaßt werden, das sich aus einem Längsglied (hier R_1) und einem Querglied (hier R_2) zusammensetzt.

Ein ferneinstellbarer Spannungsteiler

Bild 2 zeigt den Schaltplan. Zum Einstellen dient ein an eine Gleichspannung angeschlossener Widerstand mit verstellbarem Abgriff (R_1). Der hiermit beeinflußbare Spannungsteiler besteht aus zwei fremdgeheizten Heißleitern:
Steht der Abgriff des Einstellwiderstandes an dem in Bild 2 oben eingetragenen Ende des Widerstandes, so bleibt R_2 ungeheizt, während R_3 voll geheizt wird. Von der auf den Eingang gegebenen Signalspannung ergibt sich hiermit am Ausgang nur ein sehr kleiner Anteil. In der entgegengesetzten Stellung des Abgriffs von R_1 ist nur R_2 geheizt, weshalb damit am Ausgang der Schaltung nahezu die volle Eingangs-Signalspannung auftritt. Die Widerstände R_2 und R_3 stellen zusammen einen **veränderbaren Spannungsteiler** dar.
Solch eine Anordnung wird allerdings meistens nicht Spannungsteiler, sondern (einstellbares) **L-Glied** genannt. Die Form des Buchstabens L deutet an, daß die beiden Teile dieses Gliedes im Schaltplan meistens

einem auf den Kopf gestellten L gemäß eingetragen werden (**Bild 3**). Man spricht in diesem Fall vom **Längsglied** (hier R_1) und **Querglied** (hier R_2) der zum Steuern dienenden Schaltung.

Wichtigstes über fremdgeheizte Heißleiter

- Ein fremdgeheizter Heißleiter ist ein Bauelement, das in einem kleinen Gehäuse einen Heißleiter und eine diesen Heißleiter umschließende Heizwicklung enthält.
- Das Gehäuse ähnelt in Form und Abmessungen den Gehäusen von Dioden oder von Transistoren.
- Die maximal zulässigen Heizströme betragen für die gängigen Typen fremdgeheizter Heißleiter üblicherweise bei 100 Ω Widerstand der Heizwicklung etwa 30 mA und bei 400 Ω statt 100 Ω davon die Hälfte.
- Mit einer Heizstromänderung zwischen etwa einem Sechstel des Maximalwertes und dem Maximalwert kann man den Heißleiter-Leitwert auf mehr als das Hunderfache erhöhen.
- Fremdgeheizte Heißleiter verwendet man vorzugsweise zum Fernbeeinflussen von Widerständen in Schaltungen, in denen die Signalspannungen Wechselspannungen sind.
- Dabei benötigt man zwischen dem Ort, an dem eingestellt werden soll, und dem Ort, an dem sich der Heißleiter mit seinem zu beeinflussenden Leitwert befindet, lediglich Gleichstrom-Leitungen.

Thyristor zum Steuern eines Universalmotors

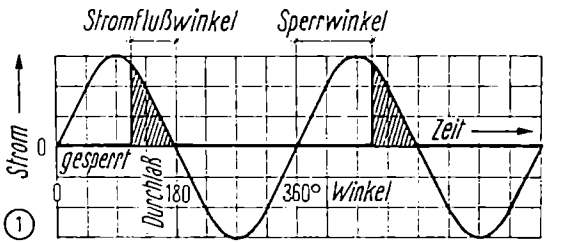
Der Thyristor — ein Wechselstrom-Stellglied

Ein Thyristor kann in seinen Durchlaßzustand nur dann versetzt werden, wenn seine Anode positiv gegen seine Katode ist (positive Speisespannung). Für die entgegengesetzte Polung besteht (natürlich innerhalb des für den Thyristor zugelassenen Spannungsbereiches) durchweg der Sperrzustand.

Sorgt man dafür, daß im Verlauf der für den Thyristor positiven Wechselspannungs-Halbwelle ein positiver Starterstrom einsetzt, so wird hiermit — für den Rest dieser Halbwelle — der Durchlaßzustand des Thyristors erreicht.

Den Beginn des Durchlaßzustandes kann man daher während jeder positiven Anoden-Katoden-Spannungshalbwelle zu einem beliebigen Zeitpunkt veranlassen, indem man in diesem Zeitpunkt einen hierfür genügenden Starterstrom bewirkt. Dieser Strom tritt auf, wenn man an den Starter gegen die Katode eine genügend hohe positive Spannung legt (Einer von Volt).

Bild 1 gibt hierzu ein Beispiel: Ihm ist (des einfachen zeitlichen Stromverlaufs zuliebe) als Last statt eines Motors ein ohmscher Widerstand zugrunde gelegt. Der



Die Sinuslinie zeigt den zeitlichen Verlauf eines Wechselstromes, den eine Sinusspannung in einem ohmschen Widerstand veranlaßt. Die schraffierten Flächen betreffen die Stromimpulse, die als Reste vom Sinusstrom allein zustandekommen, wenn der Stromweg jeweils nach Ablauf vom 0,63fachen der Zeit der positiven Spannungshalbwellen für den Rest dieser Halbwellen freigegeben wird.

Stromdurchgang wird in diesem Fall erst innerhalb der zweiten Hälfte der positiven Halbwelle gestartet. In Bild 1 ist der zeitliche Sinusverlauf des Wechselstromes so eingetragen, als ob der Wechselstrom durchweg zustande käme. Von diesem Stromverlauf wurde der Stromanteil, der vom Thyristor durchgelassen wird, mit Schraffur hervorgehoben.

Gemäß Bild 1 gibt man die Zeiten, in denen der Strom durchgelassen bzw. der Stromdurchgang gesperrt wird üblicherweise als Winkel an, wobei einer Periode 360° zugeordnet sind:

Der **Sperrwinkel** kennzeichnet von einer Periode bzw.

hier von einer halben Periode des Wechselstromes (oder der Wechselspannung, was dasselbe bedeutet) den Bruchteil, während dem der Stromdurchgang gesperrt ist. In Bild 1 bezieht sich der Sperrwinkel nur auf die positiven Halbwellen. Statt Sperrwinkel sagt man auch **Zündwinkel.**

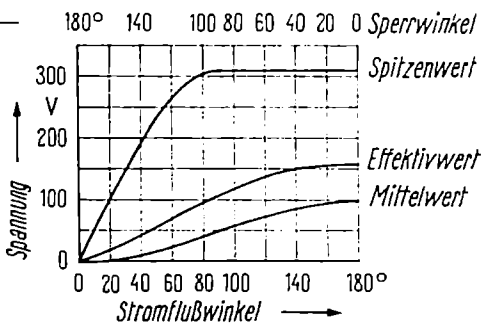
Der **Stromflußwinkel** entspricht von einer Periode bzw. von einer Halbperiode des Wechselstromes dem Bruchteil, während dem der Strom durchgelassen wird. **Bild 2** stellt dar, wie der

Spitzenwert, d. h. der höchste Augenblickswert, der

Effektivwert, d. h. der für die Leistung maßgebende Durchschnittswert und der

Mittelwert, d. h. der Gleichstromanteil des durchgelassenen Stromes

von dem Stromflußwinkel bzw. von dem auf die positiven Halbwellen beschränkten Sperrwinkel abhängt. Wenn man dem Sperrwinkel die gesamte Periode zugrundelegt, sind zu den in Bild 2 oben eingetragenen Winkelwerten für die negative Halbperiode, während der ja hier kein Strom fließt, jeweils 180° zuzuzählen.



② Hier sind die Stromwerte, die sich abhängig vom Stromflußwinkel aufgrund einer Sinusspannung in einem ohmschen Widerstand ergeben, auf die hierzu gehörenden Spannungswerte umgerechnet. Dieses Bild bezieht sich auf Bild 1. Es handelt sich somit nur um Bild 1. Während der negativen Halbwellen fließt kein Strom. Den Sperrwinkel-Zahlenwerten liegen alleln die positiven Spannungs-Halbwellen zugrunde. Will man ihn auf die ganze Periode beziehen, so muß man durchweg die 180° für die nicht ausgenutzten negativen Halbwellen zuzählen.

Ein Universalmotor

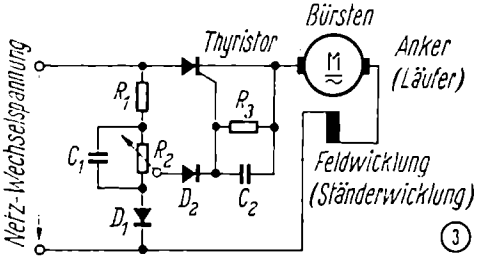
Ein solcher Motor ist insofern universal, als er sowohl an Gleichspannung wie auch an Wechselspannung (mit einer Frequenz, die höchstens nicht sehr weit über der Netzfrequenz liegen darf) oder an einer pulsierenden Spannung betrieben werden kann.

Eine **pulsierende Spannung** ist eine aus einer Gleichspannung und einer (periodischen) Wechselspannung bestehende Gesamtspannung, deren Vorzeichen nicht wechselt. In vielen Fällen handelt es sich dabei um eine Gesamtspannung, die zwischen Null und einem Scheitelwert stets desselben Vorzeichens periodisch schwankt.

Manche Leute nennen so etwas eine **pulsierende Gleichspannung.** Das ist falsch: Eine Gleichspannung hat einen zeitlich gleichbleibenden Augenblickswert. Der Bezeichnung »pulsierende Gleichspannung« entspräche z. B. der Ausdruck »**reitende Gebirgsmarine**«. Doch nun zurück zum Universalmotor. Ein solcher Motor, wie er in Küchengeräten, in Büromaschinen und in vielen Elektrowerkzeugen enthalten ist, hat eine auf seinem **Ständer** (seinem feststehenden Teil) angeordnete Wicklung, die über die **Bürsten** mit der in Nuten des **Läufers** eingebrachten Wicklung in Reihe geschaltet ist (siehe **Bild 3**). Die Drehgeschwindigkeit eines Universalmotors nimmt mit steigender Belastung stark ab. Auch mit einem Vorwiderstand kann man die Drehgeschwindigkeit herabsetzen. Ebenso wie ein einstellbarer Vorwiderstand wirkt sich ein passend gesteuerter Thyristor aus. Er ermöglicht mit dem Verringern seines Stromflußwinkels ein Herabsetzen der Motor-Drehgeschwindigkeit.

Eine Schaltung

Bild 3 enthält den Schaltplan der hier zugrunde gelegten Schaltung. Rechts in Bild 3 erkennt man das Schaltzeichen eines Universalmotors. Wie man sofort sieht, ist der Thyristor wie ein Vorwiderstand eingefügt. Die Schaltung enthält außerdem einen Spannungsteiler mit einer Ventildiode und mit einem Widerstand, der

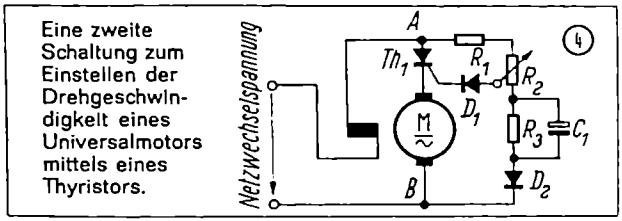


Steuerschaltung für einen an der Netzwechselspannung betriebenen Universalmotor. Der Stromflußwinkel kann am Widerstand R_2 eingestellt werden. Der Stromdurchgang durch den Thyristor wird gestartet, wenn die Spannung am Kondensator C_2 den zum Starten erforderlichen Wert erreicht hat.

einen einstellbaren Abgriff hat. Schließlich finden sich in der Schaltung nach Bild 3 eine weitere Ventildiode D_2 ein Kondensator C_1 und ein Widerstand R_3.

Zum Steuern der Motor-Drehgeschwindigkeit benötigt man, wie in dem Schaltplan gezeigt wird, keine komplizierten Steuerschaltungen.

Es genügt ein Spannungsteiler, in dem ein Widerstand mit einstellbarem Abgriff, ein Kondensator und eine Ventildiode enthalten sind. Mit dem Verstellen des Abgriffs am Widerstand R_2 kann man den Motorstrom ändern: Die abgegriffene, den Thyristor beeinflussende Spannung ist wegen der Diode D_1 und des Kondensators C_1 die Summe aus einer Gleichspannung und einer Wechselspannung.



Eine zweite Schaltung zum Einstellen der Drehgeschwindigkeit eines Universalmotors mittels eines Thyristors.

Die Bauelemente D_2, C_2 und R_3 dienen zum Schutz des Thyristors.

Die Feldwicklung kann man, wie in Bild 3 eingetragen mit dem Motorständer unmittelbar in Reihe schalten. Man legt sie aber oft auch vor den Anschluß des Steuerspannungszweiges (hier R_1, R_2, C_1, D_2).

Eine zweite Schaltung

In ihr liegt der Steuerspannungszweig parallel zum Anker des Motors (**Bild 4**). Diese Schaltung ist besonders da zu empfehlen, wo vor allem die niedrigen Motor-Drehgeschwindigkeiten einigermaßen unabhängig vom Drehmoment sein sollen.

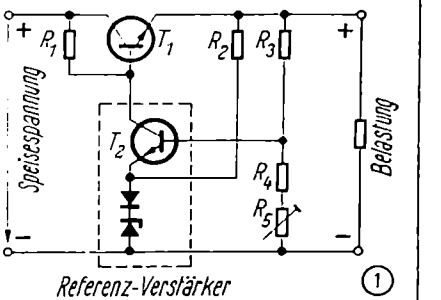
Zum Starten des Thyristors kommt als Starter-Katoden-Spannung der Überschuß der Summe der positiven Augenblickswerte des am Widerstand R_2 abgenommenen Teils der Wechselspannung des Punktes A gegen den Punkt B über die Ankerspannung in Betracht. Die Ankerspannung steigt mit der Anker-Drehgeschwindigkeit. Dabei sinken der eben erwähnte Überschuß und deshalb der Stromflußwinkel. Das bedeutet ein Vermindern des Drehgeschwindigkeitsanstiegs!

Hier zu Bild 4 Dimensionierungshinweise für Netzspannungs-Nennwert 220 V : R_1 = 5,6 kΩ, 5,5 W, R_2 = 1 kΩ, 1 W, R_3 = 270 Ω, 0,5 W, C_1 = 16 µF, 100 V, D_1 = D_2 = Valvo BYX 10, Th_1 z. B. = Valvo BT 100.

Wichtigstes über das Steuern mit Thyristoren im Wechselspannungsbetrieb

- Bei Wechselspannungsbetrieb kann man Thyristoren zum Steuern des Stromes verwenden, ohne dafür komplizierte Schaltungen zu benötigen.
- Bei einem solchen Betrieb fällt der Thyristor gegen Ende jeder für ihn positiven Wechselspannungs-Halbwelle von selbst in seinen Blockier- bzw. Sperrzustand zurück.
- Eine regelmäßige Folge von gleichsinnigen Stromimpulsen ergibt sich, solange während jeder für den Thyristor positiven Wechselspannungs-Halbwelle an der Starter-Katoden-Strecke die Bedingung für das Kippen in den Durchlaßzustand erfüllt wird.
- Indem man diese Bedingung während der positiven Spannungs-Halbwelle immer später einsetzen läßt, kann man den Mittelwert des vom Thyristor durchgelassenen Stromes — ausgehend von dem zur vollständigen Halbwelle gehörenden Mittelwert — beliebig herabsetzen.

Referenz-Verstärker in Gleichspannungs-Stabilisator



Schaltung zum Stabilisieren einer Ausgangs-Gleichspannung. Die Speisespannung muß höher sein als die an der Belastung erforderliche Spannung. Der Transistor T_1 dient als gesteuerter Vorwiderstand. Der ihn steuernde Basisstrom folgt aus dem Vergleich der Referenzverstärker-Steuerspannung mit einem Teil der Last-Klemmenspannung.

Was heißt Referenz-Verstärker?

Der Referenz-Verstärker ist die Kombination einer Z-Diode mit einem Transistor, wobei mit der Z-Diode meistens eine Ventil-Diode in Reihe liegt. Diese Kombination wird für Stabilisierungszwecke an Stelle einer Z-Diode dann verwendet, wenn von der Referenzspannung eine besonders geringe Temperatur-Abhängigkeit verlangt wird.

Eine Schaltung

Das **Bild 1** enthält den Schaltplan eines mit einem Referenzverstärker ausgerüsteten Gleichspannungs-Konstanthalters. Der Transistor T_1 wirkt als gesteuerter Last-Vorwiderstand.

Funktion der Schaltung

Bei Anstieg der Last-Klemmenspannung über ihren Sollwert ergibt sich für den Transistor T_2 eine erhöhte Basis-Emitter-Spannung und deshalb eine Zunahme seines Collectorstromes. Dieser Strom durchfließt den Widerstand R_1.

Mit dem zunehmenden Strom wird die an dem Widerstand R_1 herrschende Spannung höher. Sie ist die Collector-Basis-Spannung des Transistors T_1. Nimmt diese Spannung zu, so geht der Wert der Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 zurück. Daraus folgt eine Zunahme des Widerstandes der Collector-Emitter-Strecke dieses Transistors. Das wirkt dem Anstieg der Last-Klemmenspannung entgegen.

Genau dementsprechend wird das Absinken der Last-

Klemmenspannung unter ihren Sollwert nahezu wettgemacht.
Die Steuerspannung des Transistors T_2 folgt aus dem Vergleich

- des Lastspannungs-Bruchteils, der an dem Widerstand (R_4 + R_5) des aus den Widerständen R_3 und (R_4 + R_5) gebildeten Spannungsteilers am Widerstand R_5 einstellbar ist, mit
- der Summe der Spannungen an den beiden Dioden und der Schleusenspannung der Basis-Emitter-Strecke des Transistors T_2.

Ein Strom durch den Transistor T_2 setzt erst ein, wenn die an dem Spannungsteiler-Abschnitt (R_4 + R_5) abgegriffene Spannung die eben genannte Spannungssumme übersteigt. Der Wert dieser Spannungssumme wird mit entsprechender Wahl der Z-Diode z. B. bei 12 V Speisespannungs-Nennwert auf etwa 9 V gebracht.

Etwas über das Bemessen der Bauelemente der Schaltung

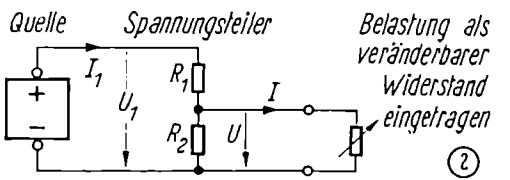
Der Widerstand R_2 muß so bemessen werden, daß beim Sollwert der Last-Klemmenspannung der die Dioden durchfließende Strom den in der Datenliste des Referenz-Verstärkers genannten günstigsten Wert annimmt. Ebenso gilt für den Collectorstrom des Transistors T_2 ein günstigster mittlerer Wert.

Der Ausgangswiderstand des aus R_3 und (R_4 + R_5) bestehenden Spannungsteilers ist der Widerstandswert, der sich für die Parallelschaltung von R_3 und (R_4 + R_5) ergibt. Dieser Wert sollte z. B. 1 kΩ betragen. Vor allem darf dieser Wert nicht zu hoch sein.
Der Mindestwert der Speisespannung muß wenigstens um die Restspannung zwischen Collector und Emitter des Transistors T_1 höher sein als der höchste konstant zu haltende Wert der Last-Klemmenspannung.
Der Transistor T_1 hat eine maximale Verlustleistung auszuhalten, die gegeben ist mit dem Produkt der Maximalwerte des Laststromes und des Überschusses der Speisespannung über den Sollwert der Last-Klemmenspannung. Natürlich dürfen außerdem die höchstzulässigen Werte der Collectorströme und der Collector-Emitter-Spannungen der beiden Transistoren nicht überschritten werden.

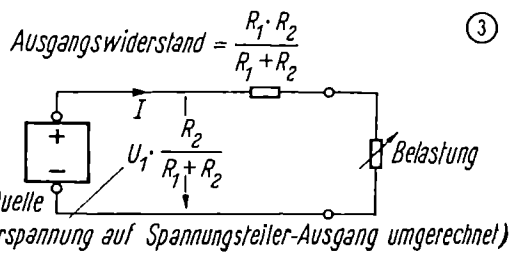
Der Spannungsteiler

Ein Spannungsteiler besteht im einfachsten Fall aus zwei Teilwiderständen, zwischen denen die Ausgangsspannung abgegriffen wird (**Bild 2**). Der Spannungsteiler kann als Schaltung mit einer Urspannung und einem Ausgangswiderstand aufgefaßt werden (**Bild 3**). Die Urspannung stimmt mit der abgegriffenen, unbelasteten Spannung überein.
Der Ausgangswiderstand hat den Wert, der gleich dem

der Parallelschaltung der beiden Teilwiderstände ist. Der nicht abgegriffene Teilwiderstand des Spannungsteilers (R_1 in Bild 2) umfaßt auch den Ausgangswiderstand der Quelle der Gesamtspannung, an der der Spannungsteiler liegt.



Variable Belastung, die über einen Widerstands-Spannungsteiler aus einer Quelle gespeist wird.

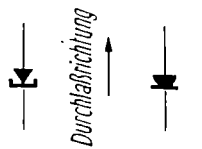


Ersatzschaltung für die Schaltung nach Bild 2. Der Ausgangswiderstand stimmt mit dem Widerstandswert der Parallelschaltung beider Spannungsteiler-Teilwiderstände überein.

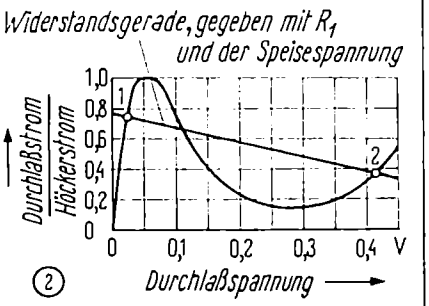
Wichtigstes über Referenz-Verstärker und Spannungsteiler

- Muß auf ein Minimum an Temperaturabhängigkeit einer Referenzspannung Wert gelegt werden, so verwendet man anstelle einer Referenz-Diode z. B. einen Referenz-Verstärker.
- Ein solcher Referenz-Verstärker besteht wenigstens aus einer Z-Diode und einem Transistor. Manchmal ist er als integrierte Schaltung ausgeführt.
- Meistens liegt in Reihe mit der Z-Diode (zum zusätzlichen Herabsetzen von Temperatur-Einflüssen) eine für Durchlaß gepolte Ventil-Diode.
- Voraussetzung für das Einhalten des in der Datenliste des Referenz-Verstärkers angegebenen Temperatur-Koeffizienten ist ein hinreichendes Übereinstimmen des Basis-Vorwiderstandes des Transistors T_2 mit dem in der Datenliste genannten Wert.
- Dieser Basis-Vorwiderstand ist der Ausgangswiderstand des Spannungsteilers R_3, (R_4 + R_5).
- Der Wert eines Spannungsteiler-Ausgangswiderstandes ist gegeben mit dem Widerstandswert der Parallelschaltung der beiden Spannungsteiler-Teilwiderstände.
- Der Ausgangs-Widerstand der Quelle, die die Spannungsteiler-Gesamtspannung zur Verfügung stellt, ist hierbei Teil des nicht abgegriffenen Spannungsteiler-Abschnittes.

Tunnel-Diode in Impuls-Restaurierungs-Stufe



Zwei Tunnel-Dioden-Schaltzeichen zur Auswahl. Beide Schaltzeichen werden verwendet.



Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunnel-Diode. Der Strom ist in Bruchteilen des Höckerstromes aufgetragen. Zusätzlich enthält dieses Bild eine Widerstandsgerade. Sie zeigt den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom für eine Gleichstromquelle mit einer Urspannung von 0,8 V und einem Kurzschlußstrom, der das 0,75-fache des Höckerstromes beträgt.

Die Tunnel-Diode

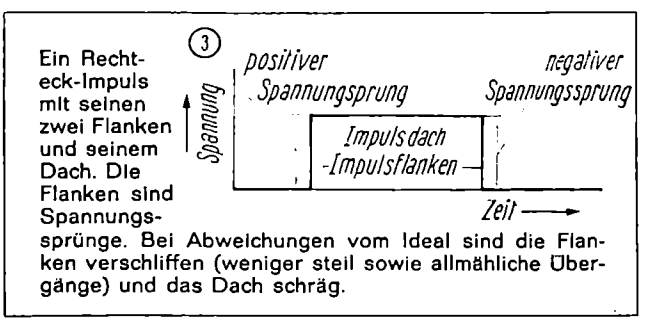
Eine Tunnel-Diode ist eine Germanium-Diode, deren Durchlaßstrom mit steigendem Wert der Durchlaßspannung zunächst ansteigt, um nach Erreichen eines bestimmten Wertes (des **Höckerstromes**) wieder abzusinken und nach Durchlaufen eines Minimums (des **Talstromes**) von neuem anzusteigen. In **Bild 1** sind zwei der für Tunnel-Dioden verwendeten Schaltzeichen gezeigt.

Bild 2 enthält die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunnel-Diode. Wie in dem Bild eingetragen, betrifft diese Kennlinie das Durchlaßverhalten. Dabei muß allerdings beachtet werden, daß die Tunnel-Diode keine Ventil-Diode ist. Bei ihr fehlt die Ventilwirkung der Ventil-Diode. Sie läßt im Gegenteil bei entgegengesetzter Polung den Strom sogar besser durch. Unter der **Durchlaßrichtung** versteht man hier nur die Richtung, die bei gleicher Zonenfolge des Halbleiter-Bauelementes der Durchlaßrichtung der Ventil-Diode entspricht.

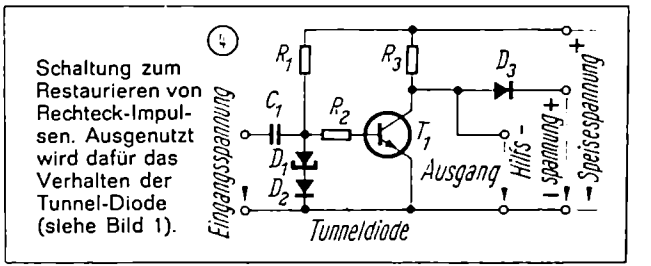
Statt Durchlaßrichtung sagt man übrigens auch **Vorwärtsrichtung** im Gegensatz zur **Rückwärtsrichtung.**
In Bild 2 ist der Strom auf den Höckerstrom bezogen. Der Talstrom beträgt hierbei etwa das 0,14-fache des Höckerstromes.

Zweck der hier zu betrachtenden Schaltung

Mit dieser Schaltung soll das Übertragen länger dauernder Rechteckimpulse (**Bild 3**) über einen Kondensator ermöglicht werden, wobei das **Impulsdach** nicht absinken darf und die **Rechteck-Impulsflanken** erhalten bzw. wiederhergestellt werden müssen.
Der mit Bild 2 gezeigte Zusammenhang zwischen Durchlaßstrom und Durchlaßspannung der Tunnel-Diode wird also in der Schaltung nach **Bild 4** ausgenutzt, um ein Absinken des Impulsdaches längerer Impulse zu verhindern bzw. um aus verschliffenen Impulsen saubere Rechteckimpulse zu gewinnen. Im Grunde handelt es sich hier aber um die Aufgabe, die sonst ein Schmitt-Trigger zu erfüllen hat.
In der Schaltung nach Bild 4 stellt die Diode D_1 die Tunnel-Diode dar. Die Diode D_2, eine Germanium-

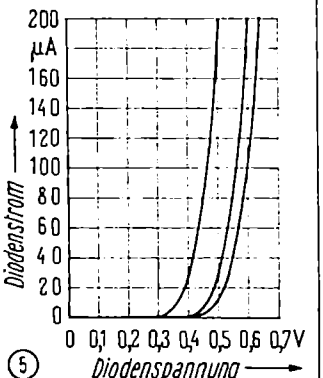


Ein Rechteck-Impuls mit seinen zwei Flanken und seinem Dach. Die Flanken sind Spannungssprünge. Bei Abweichungen vom Ideal sind die Flanken verschliffen (weniger steil sowie allmähliche Übergänge) und das Dach schräg.



Schaltung zum Restaurieren von Rechteck-Impulsen. Ausgenutzt wird dafür das Verhalten der Tunnel-Diode (siehe Bild 1).

Diode, soll mit ihrer relativ niedrigen Durchlaßspannung (**Bild 5**) die Gesamtspannung des Verbindungspunktes von R_1 mit R_2 gegen den Minuspol auf den Wert bringen lassen, mit dem der Transistor T_1 durchgeschaltet wird. Die Reihenschaltung beider Dioden liegt über den Widerstand R_1 an der Speisespannung. Im Ruhezustand der Schaltung ergibt sich so der in Bild 2 mit dem Punkt 1 markierte Betriebsfall:
An der Tunnel-Diode herrscht nur die niedrige Spannung, die gemäß Punkt 1 in Bild 2 beispielsweise 0,025 V = 25 mV beträgt. Läßt man auf den Eingang einen positiven Spannungssprung (siehe Bild 3) einwirken, so wird damit der die Reihenschaltung beider Dioden durchfließende Strom erhöht. Wenn die Strom-Zunahme so bedeutend ist, daß hierbei der Höckerstrom der Diode überschritten wird, stellt sich an der Tunnel-Diode der Betriebszustand ein, der dem in Bild 2 eingetragenen Punkt 2 entspricht. Dazu gehört an der Tun-



Strom-Spannungs-Durchlaßkennlinien von drei Germanium-Dioden für eine Temperatur von 25 °C. Die Tatsache, daß diese drei Kennlinien nicht zusammenfallen, zeigt das Vorhandensein von Streuungen des Verhaltens zwischen Exemplaren desselben Typs an.

nel-Diode beispielsweise eine Spannung von rund 0,4 V. Das bedeutet eine Dioden-Gesamtspannung von etwas mehr als 0,8 V. Diese Spannung genügt, um den mit dem positiven Eingangs-Spannungsimpuls eingeleiteten Durchlaßzustand des Transistors aufrecht zu halten.

Das Ende des positiven Eingangsspannungs-Impulses (genauer der den positiven Impuls abschließende negative Spannungssprung) wirkt sich auf die nachfolgende Schaltung über den Kondensator C_1 als negativer Impuls aus. Hiermit wird der die Dioden-Reihenschaltung durchfließende Strom soweit geschwächt, daß der Stromwert jetzt den Wert des Talstromes der Tunnel-Diode unterschreitet. Folglich kippt die Reihenschaltung des Widerstandes R_1 mit der Tunnel-Diode in ihren ursprünglichen Zustand zurück: Es stellt sich wieder der Betriebsfall ein, dem in Bild 2 der Punkt 1 zugeordnet ist. Damit bleibt der Transistor bis zum nächsten positiven Spannungssprung gesperrt. Somit entsteht im Ausgang der Schaltung ein exakter Rechteck-Impuls mit dementsprechend eindeutigem Impuls-Ende.

Klemm-Diode

Mit Hilfe der Diode D_3 wird der Wert der Collector-Emitter-Spannung für den gesperrten Transistor auf den Wert der Hilfsspannung begrenzt. Diese Hilfsspannung bemißt man z. B. mit 6 V, wenn die Speisespannung 12 V betragen soll. Das geschieht zum Verkürzen der Transistor-Schaltzeiten. Die Ausgangsspannung der Schaltung wechselt zwischen dem um die Durchlaßspannung der Diode D_3 erhöhten Wert der Hilfsspannung und der Collector-Emitter-Restspannung des Transistors.

Ein solches Festhalten eines Spannungswertes bezeichnet man als **»Klemmen auf diese Spannung«**. Das Klemmen geschieht üblicherweise — wie hier — mit Ventil-Dioden. Eine so benutzte Ventil-Diode heißt Klemm-Diode.

Wichtigstes über die Tunneldiode als kippbares Bauelement

- Durchlaßstrom und Durchlaßspannung der Tunnel-Diode hängen in besonderer Weise zusammen:
- Beim Anstieg der Durchlaßspannung vom Wert Null aus ergibt sich erst ein Strom-Maximum (der Höckerstrom) und dann ein Strom-Minimum (der Talstrom). Anschließend steigt der Durchlaßstrom bei weiter erhöhter Durchlaßspannung in prinzipiell gleicher Weise an wie bei einer Ventil-Diode.
- Aufgrund dieses Zusammenhanges zwischen Durchlaßstrom und Durchlaßspannung kann die Tunnel-Diode für eine zwischen zwei Zuständen kippbare Schaltung ausgenutzt werden.
- Bei Anlegen der Reihenschaltung einer Tunnel-Diode mit einem Widerstand an eine der Tunnel-Dioden-Durchlaßrichtung gemäß gepolte Gleichspannung ergeben sich mit dazu passenden Werten der Spannung und des Widerstandes zwei stabile Betriebsfälle.
- Die beiden Betriebsfälle unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Wertes der Spannung an der Tunnel-Diode.
- In einem Betriebsfall beträgt die Spannung an der Tunnel-Diode Zehner von Millivolt. Im anderen Betriebsfall sind es Hunderte von Millivolt.
- Man erreicht den Übergang von der geringeren zur höheren Spannung, indem man den die Tunnel-Diode durchfließenden Strom vorübergehend über den Hökkerwert hinaus erhöht.
- Den anderen Übergang von der hohen zu der niedrigen Spannung bewirkt man, indem man den Strom der Tunnel-Diode vorübergehend unter den Talwert absenkt.
- Ein Absinken des Stromes mit zunehmender Spannung, wie Bild 2 dies für 0,07 V bis 0,28 V veranschaulicht bedeutet in diesem Spannungsbereich **negative Leitwerte.**
- Der einzelne **differentielle negative Leitwert** bezieht sich jeweils auf einen verschwindend kleinen Spannungsbereich und einen dementsprechenden Strombereich.
- Im Strom-Spannungs-Kennlinienbild entspricht der Betrag des differentiellen negativen Leitwertes der Kennlinien-Neigung.
- Setzt man in Bild 2 den Höckerstrom mit 4 mA an, so ergibt sich für den differentiellen negativen Leitwert das Maximum zu 4 mA : (80 mV) = 50 mS und zwar bei etwa 0,11 V.

Triac als Wechselstrom-Schalter

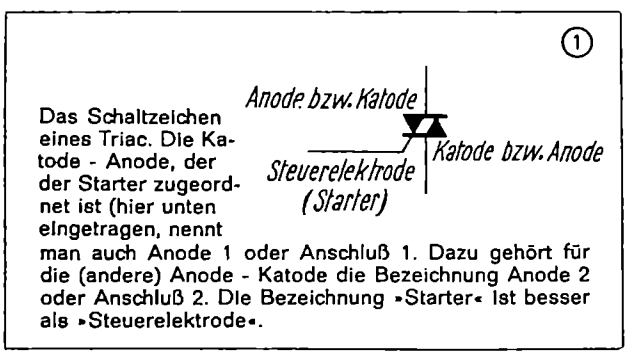
Der Triac

Ein Triac ist ein **Vollweg-Thyristor.** Die Bezeichnung »Triac« entstand aus dem Zusammenziehen des englischen Ausdrucks: »**Triode alternating current switch**«, was »als Triode ausgebildeter Wechselstromschalter« bedeutet. Mit der Bezeichnung »**Triode**« soll gekennzeichnet werden, daß außer den beiden Anschlüssen, die zum Einfügen in den zu schaltenden Wechselstromweg gehören, nur ein **Steuerelektroden-Anschluß (Starter-Anschluß)** vorhanden ist (**Bild 1**).

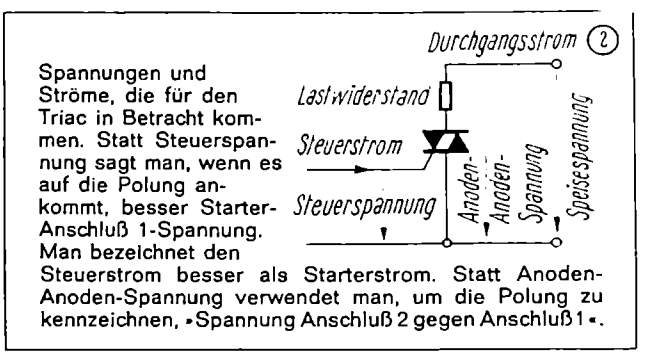
Der Starter-Anschluß ermöglicht es, den Stromdurchgang ebenso zu **starten** wie beim **Halbweg-Thyristor,** den man meistens schlechtweg nur Thyristor nennt. Dabei leitet der Starterstrom des Triacs den Stromdurchgang sowohl in der einen, wie auch in der anderen Richtung ein.
Der Triac fällt ebenso wie der Halbweg-Thyristor jedesmal in den Sperrzustand zurück, wenn der von ihm durchgelassene Strom unter dessen Haltebetrag absinkt.

Die Strom-Spannungs-Kennlinien

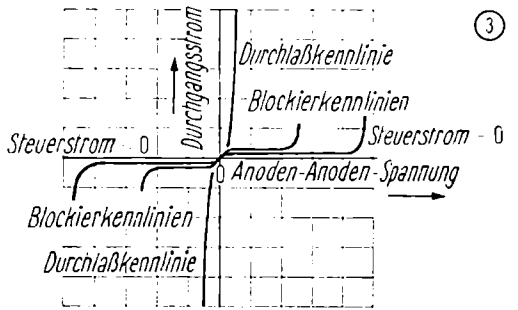
Für jede der beiden Stromrichtungen stimmen diese Kennlinien ziemlich genau mit den Blockierkennlinien



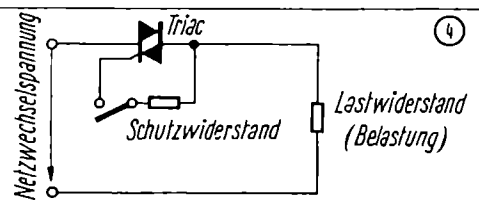
Das Schaltzeichen eines Triac. Die Katode - Anode, der der Starter zugeordnet ist (hier unten eingetragen, nennt man auch Anode 1 oder Anschluß 1. Dazu gehört für die (andere) Anode - Katode die Bezeichnung Anode 2 oder Anschluß 2. Die Bezeichnung »Starter« ist besser als »Steuerelektrode«.



Spannungen und Ströme, die für den Triac in Betracht kommen. Statt Steuerspannung sagt man, wenn es auf die Polung ankommt, besser Starter-Anschluß 1-Spannung. Man bezeichnet den Steuerstrom besser als Starterstrom. Statt Anoden-Anoden-Spannung verwendet man, um die Polung zu kennzeichnen, »Spannung Anschluß 2 gegen Anschluß 1«.



Die Strom-Spannungs-Kennlinien des Triac. Es handelt sich dabei um zwei Durchlaßkennlinien (je eine der beiden Stromrichtungen) und um zwei Scharen von Blockierkennlinien. Die im 1. und 3. Quadranten verlaufenden Kennlinien entsprechen sich gegenseitig.



Schaltung eines Triac als Wechselstrom-Schütz. Mit dem Schalter braucht lediglich der Starterstrom geschaltet zu werden. Bei geschlossenem Schalter kommen beide Halbwellen des Wechselstromes zustande, wie dies dem Fall des Bildes auf Seite 21 entspricht. Die hier gezeigte Triac-Schaltung ist somit der Thyristorschaltung nach Bild 4 auf Seite 21 in der Funktion gleichwertig.

und der Durchlaßkennlinie des (Halbweg-)Thyristors überein. Das **Bild 2** veranschaulicht in einer Schaltung das, was für die mit **Bild 3** gezeigten Kennlinien die Grundlage bildet.

Die Schaltung des Wechselstrom-Schütz

In der Schaltung nach **Bild 4** arbeitet der Triac als Wechselstrom-Schütz. Notwendig sind dazu — außer dem Triac selbst — lediglich ein Schutzwiderstand, der den Starterstrom begrenzt, und ein Schalter, wie man ihn zum Betätigen eines Schützes stets benötigt. Der **Schutzwiderstand** hat den Zweck, den Triac damit zu schützen, daß er den Starterstrom begrenzt. Ohne den Schutzwiderstand würde der Starterstrom bis zum Zeitpunkt, in dem der Stromdurchgang durch den Triac während jeder Halbwelle der Wechselspannung einsetzt, viel zu hoch ausfallen.

Bei geöffnetem Schalter ist der Triac für beide Polungen des Wechselspannungs-Augenblickswertes blokkiert. Schließt man den Schalter, so liegt — bei eben noch gesperrtem Triac — dessen Steuerelektrode über den Schutzwiderstand an der vollen Wechselspannung. Hiermit ist der Stromdurchgang für die halbe Wechselspannungsperiode, während der der Schalter geschlossen wurde, veranlaßt. Gegen Ende der halben Periode wird der **Haltewert des Stromes** unterschritten, womit

der Triac wieder blockiert, d. h. in seinen Sperrzustand zurückgefallen ist.
Bleibt der Schalter geschlossen, so tritt der Durchlaßzustand des Triacs immer wieder von neuem ein, sobald der Augenblickswert der Wechselspannung am Triac (mit der entgegengesetzten Polung wie zuvor) wieder etwas angestiegen ist. Auf diese Weise tritt während jeder Halbperiode ein Strom auf. Dessen Richtung wechselt natürlich von Halbperiode zu Halbperiode der Wechselspannung gemäß. Der Wert des Stromes ist bei einem ohmschen Lastwiderstand in jedem Zeitpunkt mit dem Verhältnis des um die Triac-Durchlaßspannung verminderten Speise-Wechselspannungs-Augenblickswertes zu dem Wert des Lastwiderstandes gegeben.
Öffnet man den Schalter, so wird — mit diesem Zeitpunkt beginnend — ein Stromdurchgang durch den Triac nicht mehr eingeleitet.

Bezeichnungen

Die beiden Anschlüsse für den zu schaltenden Strom werden **Anode 1** oder **Anschluß 1** und **Anode 2** oder **Anschluß 2** genannt. Dabei kennzeichnet 1 denjenigen der beiden Anschlüsse gegen den die Starterspannung angelegt wird (in Bild 1 ist das der unten eingetragene Anschluß).

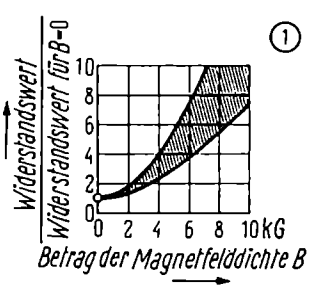
Das Wichtigste über den Triac

- Ein Triac ist ein Halbleiter-Bauelement mit drei Anschlüssen. Der Triac wird gelegentlich »Vollweg-Transistor« genannt.
- Die zwischen zwei der drei Triac-Anschlüsse liegende Strecke des Triacs kann als Wechselstromschalter ausgenutzt werden.
- Bei offenem dritten Anschluß (dem Starter- oder Steuerelektroden-Anschluß) ist die Strecke zwischen den zuerst genannten Anschlüssen für beide Stromrichtungen blockiert: Diese Strecke befindet sich hierbei im Sperrzustand.
- Unter dem Einfluß eines Starterstromes kippt der Triac während einer jeden Wechselspannungs-Halbwelle — unabhängig von deren Polung — in den Durchlaßzustand.
- Sinkt der Strom bei abnehmendem Augenblickswert der Wechselspannung unter einen bestimmten, sehr kleinen Betrag (den Haltestrom-Betrag) ab, so fällt der Triac jedesmal in den Sperrzustand zurück.
- Der Triac bleibt bei einem Verwenden als Wechselstrom-Schütz jeweils blockiert bis der Betrag des (beliebig gepolten) Augenblickswertes der Wechselspannung etwas angestiegen ist und ein passender Starterstrom den Triac von neuem in den Durchlaßzustand kippt.

Feldplatte in einer Schaltung als Magnetfeldfühler

Feldplatten

Eine Feldplatte ist ein mit zwei Anschlüssen versehenes Halbleiter-Bauelement, dessen Widerstandswert ansteigt, wenn der Betrag der Dichte eines Magnetfeldes, das dieses Bauelement durchdringt, zunimmt.
Bild 1 veranschaulicht den Bereich der Widerstands-



Einfluß der Dichte von Magnetfeldern, die Feldplatten durchdringen, auf die Widerstände der Feldplatten. Die Kennlinien der diversen Feldplattentypen verlaufen innerhalb des hier schraffierten Bereiches.

Zunahme für z. Z. verfügbare Feldplatten-Typen. Die Polarität des Magnetfeldes spielt für die Widerstands-Erhöhung keine Rolle. Deshalb steht in Bild 1 an der waagerechten Achse nicht »Wert« sondern »Betrag« der Magnetfelddichte. Die Feldplatten-Typen unterscheiden sich vor allem in Bezug auf den

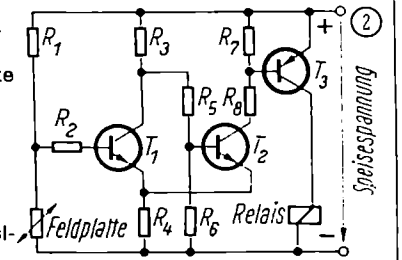
- Aufbau (fast alle Typen sind ebene, dünne Plättchen), das
- wirksame Material (höherer oder niedrigerer Grad der Abhängigkeit des Widerstandswertes von der Magnetfelddichte sowie größerer oder kleinerer Widerstands-Temperaturkoeffizient) sowie die
- Belastbarkeit, d. h. die der Feldplatte zuzumutende Verlustleistung, die mit den Ausmaßen der Feldplatten zunimmt.

Eine Zwischenbemerkung nur für den Leser, der daran interessiert sein könnte:
Die Buchstaben kG in Bild 1 bedeuten **Kilogauß.** Das **Gauß** ist eine **Einheit der Magnetfelddichte.** Ein Gauß hat einen Wert von 10^{-8} Voltsekunden je Windung und Quadratzentimeter. Hieraus folgt (bezogen auf eine Windung):

$$1\,kG = 10^{-5}\,V \cdot s : cm^2 = 0{,}1\,V \cdot s : m^2.$$

Die Schaltung

Sie besteht, wie der mit **Bild 2** gezeigte Schaltplan erkennen läßt, aus den drei nachstehend genannten Tei-



Eine von einer Feldplatte als Magnetfeldfühler gesteuerte Schmitt-Trigger-Schaltung, die mit einer Endstufe ergänzt ist. Man beachte die Ankopplung der Endstufe mit dem pnp-Transistor an die vorangehende Stufe mit dem npn-Transistor.

len, wobei es sich für einen Teil um ein Bauelement, für einen zweiten Teil um eine Schaltung und für den dritten Teil um eine Schaltungsstufe handelt. Die drei Teile sind:

- eine Feldplatte als **Magnetfeldfühler** (von einem Magnetfeld hinsichtlich einer wesentlichen elektrischen Eigenschaft, d. h. hier des Widerstandswertes, beeinflußbares Bauelement),
- ein **Schmitt-Trigger**, d. h. eine Schaltung, deren zweite Stufe zwischen Sperr- und Durchschaltzustand kippt, wenn die Eingangsspannung einen Grenzwert passiert, und
- eine ein Relais enthaltende Endstufe, deren Transistor unter dem Einfluß des Schmitt-Triggers ebenfalls entweder in den Sperrzustand oder in den Durchschaltzustand gesteuert wird.

Arbeitsweise der Schaltung

Die Feldplatte ist ein Teil des Basis-Spannungsteilers für den Transistor T_1. Wirkt auf die Feldplatte kein Magnetfeld ein, so ist ihr elektrischer Widerstand gemäß Bild 1 verhältnismäßig gering. Das bedeutet für den Transistor T_1 einen kleinen Wert der Spannung seiner Basis gegen den Minuspol der Speisespannung. Dabei liegt diese Spannung in dem unteren Bereich, dem der eine der beiden Zustände des Schmitt-Triggers zugeordnet ist.

Der Transistor T_1 ist in diesem Zustand zunächst gesperrt. Aufgrund des Sperrzustandes des Transistors T_1 erhält der Transistor T_2 von dem aus R_3, R_5 und R_6 bestehenden Spannungsteiler einen Basisstrom, der diesen Transistor durchschaltet. Hiermit wird auch für den Transistor T_3 der Durchschaltzustand bewirkt.

Sobald auf die Feldplatte ein Magnetfeld mit genügender Dichte einwirkt, steigt der Feldplattenwiderstand an. Damit ergibt sich für den Transistor T_1 eine höhere Spannung seiner Basis gegen den Minuspol der Speisespannung.

Wenn diese Spannung auf die Summe aus der Spannung am Widerstand R_4 und der Schleusenspannung der Basis-Emitter-Strecke des Transistors T_1 angestiegen ist, beginnt jetzt der Stromdurchgang durch den Transistor T_1. Der hierbei den Widerstand R_3 durchfließende Strom bewirkt an diesem Widerstand R_3 eine

Spannung. Aufgrund dessen sinkt die Spannung der Basis des Transistors T_2 gegen den Minuspol der Speisespannung und daher auch der Wert des Stromes durch den Transistor T_2. Die Abnahme dieses Stromes überwiegt zunächst das Hinzukommen des Stromes durch den Transistor T_1. Folglich wird die Spannung an dem von der Summe beider Ströme durchflossenen Widerstand R_4 geringer. Das bedeutet bei gegebenem Wert der Spannung der Basis des Transistors T_1 gegen den Minuspol einen zusätzlichen Anstieg der Basis-Emitter-Spannung des Transistors T_1 und hiermit des den Transistor T_1 durchfließenden Stromes. Dies beschleunigt das Sperren des Transistors T_2, was sich auf das Durchschalten des Transistors T_1 auswirkt. Der Wechsel vom **Sperrzustand** des Transistors T_1 und dem **Durchschaltzustand** des Transistors T_2 auf den **Durchschaltzustand** des Transistors T_1 und den **Sperrzustand** des Transistors T_2 erfolgt somit als Kippvorgang: Er geschieht sprunghaft.

Nimmt die Dichte des die Feldplatte durchsetzenden Magnetfeldes wieder ab, so wird der Feldplattenwiderstand geringer. Deshalb sinkt die Spannung der Basis des Transistors T_1 gegen den Minuspol der Speisespannung. Wenn diese Spannung dabei den Wert durchläuft, bei dem das Kippen während des Spannungsanstiegs erfolgte, geschieht noch nichts. Erst bei einer nur wenige zehntel Volt geringeren Spannung kippt die Schaltung in ihren ursprünglichen Zustand zurück.

Zu diesem Kippen gehört nämlich das Ende des Sperrzustandes des Transistors T_2. Der Sperrzustand von T_2 endet aber erst, wenn der Strom durch den Transistor T_1 einen gewissen Wert angenommen hat.

Der Transistor T_2 steuert den Endstufen-Transistor T_3 mit der Spannung am Widerstand R_7: Bei gesperrtem Transistor T_2 ist diese Spannung Null. Dazu gehört für den Transistor T_3 ebenfalls der Sperrzustand. Bei durchgeschaltetem Transistor T_2 ergibt sich am Widerstand R_7 eine Spannung, die T_3 durchschaltet.

Man beachte, daß T_2 ein npn-Transistor ist, während T_3 einen pnp-Transistor darstellt. Hiermit ergibt sich die außerordentlich einfache Kopplung des Transistors T_3 an den Transistor T_2. Eine solche **npn-pnp-Kopplung** ist in vielen Fällen nützlich.

Das Wichtigste über Feldplatten

- Eine Feldplatte ist ein elektrischer Widerstand, dessen Widerstandswert steigt, wenn man die Feldplatte von einem Magnetfeld durchdringen läßt.
- Der Feldplattenwiderstand steigt bei dem Durchgang eines Magnetfeldes mit einer Dichte von 10 Kilogauß je nach Feldplattentyp auf das sieben- bis sechzehnfache.
- Feldplatten mit besonders starkem Einfluß von Magnetfeldern auf den Widerstandswert haben relativ hohe Widerstands-Temperaturkoeffizienten (in der Umgebung von 25 °C bis zu etwa —0,025 je Grad Celsius).

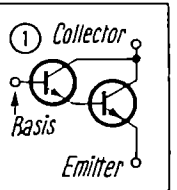
Mehrfach-Transistor für Flüssigkeitsstands-Kontrolle

Darlington-Schaltung

Ein Mehrfach-Transistor ist eine Transistor-Kombination mit drei Anschlüssen. Bezüglich der Anschlüsse stimmt der Mehrfach-Transistor mit dem Einzel-Transistor überein. Was ihn vom Einzel-Transistor unterscheidet ist die Mehrzahl seiner Systeme. Meistens handelt es sich dabei um zwei Systeme.

Bild 1 zeigt einen Zweisystem-Transistor in Darlington-Schaltung. Diese Schaltung hat — wie ein Einzel-Transistor — einen Basis-Anschluß, einen Emitter-Anschluß und einen Collector-Anschluß. Gesteuert wird dabei wie bei einem Einzel-Transistor. Das ist hier der Basisstrom des in Bild 1 links eingetragenen Transistor-Systems. Der weit höhere Emitterstrom dieses Transistorsystems steuert seinerseits das andere Transistor-System.

Da man beim Transistor normalerweise den Emitterstrom-Betrag etwa gleich dem Collectorstrom-Betrag setzen darf, ergibt sich für ein Collector-Basis-Gleichstromverhältnis (Formelzeichen B) des Einzel-Transistors von beispielsweise 90 in der Gesamtschaltung ein solches Verhältnis $B_{ges} \approx 90 \cdot 90 = 8100$.



Eine aus zwei npn-Transistoren aufgebaute Darlingtonschaltung. Diese Schaltung hat — wie ein einzelner Transistor — nur je einen Basis-, Emitter und Collector-Anschluß.

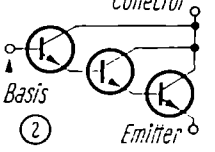
Die Schleusenspannung

Man beachte, daß ein Basisstrom und damit ein Collectorstrom sowie ein Emitterstrom in der aus zwei Transistoren bestehenden Darlington-Schaltung erst einsetzen, wenn die Spannung des Basis-Anschlusses gegen den Emitter-Anschluß dieser Schaltung die Summe der Basis-Emitter-Schleusenspannungen der beiden Transistoren (für Silizium-Transistoren hier im Mittel insgesamt etwa $2 \cdot 0{,}7$ V) überschreitet.

Drei Transistor-Systeme

Bild 2 zeigt eine Kombination dreier Transistor-Systeme in der Weise, wie das für die beiden gemäß Bild 1 zusammengeschalteten Transistor-Systeme gilt. Hierbei ergeben sich als Gesamt-Collector-Basis-

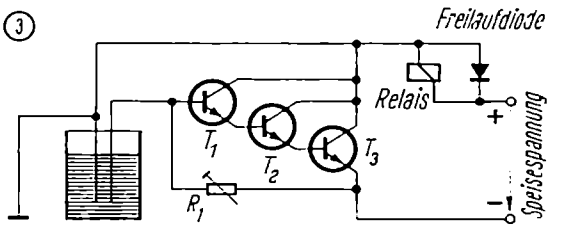
Eine drei npn-Transistoren umfassende Darlingtonschaltung. Auch sie hat lediglich drei Anschlüsse. Sie wirkt sich in der Schaltung aus wie ein einzelner Transistor mit einem sehr hohen Collector-Basis-Stromverhältnis.



Gleichstromverhältnis B_{ges} das Produkt aus den drei Collector-Basis-Gleichstromverhältnissen B_1, B_2 und B_3 der drei einzelnen Transistoren sowie als Gesamt-Schleusenspannung die Summe der drei Einzel-Schleusenspannungen. Auch diese Schaltung kann als Darlington-Schaltung bezeichnet werden.

Die vom Pegelstand einer Flüssigkeit gesteuerte Schaltung

Bild 3 zeigt den Schaltplan. Die Schaltung besteht aus einem Dreifach-Transistor, einem Relais mit einer dazu parallel liegenden Freilauf-Diode und einem Einstellwiderstand. Es handelt sich hier um eine Flüssigkeit, die den elektrischen Strom (schwach) leitet. In den Behälter, dessen Flüssigkeitsstand interessiert, tauchen zwei einander parallel angeordnete Sondendrähte ein. Wenn der Flüssigkeitspegel ansteigt, nimmt damit der Leitwert zwischen den zwei Sondendrähten zu.
Unter einer **Sonde** versteht man in der Elektrotechnik und Elektronik einen leitenden meist stabförmigen Teil, der z. B. in eine Flüssigkeit eintauchend, einen elektrischen Anschluß an diese vermittelt.
Die Flüssigkeits-Strecke zwischen den zwei Sondendrähten bildet mit dem Widerstand R_1 einen Basis-Spannungsteiler. An dessen Abgriff liegt die Basis des ersten Transistors der Darlingtonschaltung. Man stellt den Widerstand R_1 so ein, daß beim Erreichen des Flüssigkeitsstandes, der zum Ansprechen des Relais führen soll, die Spannung am Widerstand R_1 gleich der Summe der drei Schleusenspannungen wird.
Bei einem nur ganz geringen weiteren Anstieg der Flüssigkeit kommt es zu einem Basisstrom des Transistors T_1 was dessen Collectorstrom zur Folge hat.



Darlingtonschaltung nach Bild 2, ausgenutzt für das Überwachen des Pegels einer leitenden Flüssigkeit. Hier handelt es sich z. B. darum, daß das Unterschreiten eines Mindestpegels überwacht werden muß: Ist der Pegel so weit abgesunken, daß die zwei Elektroden nicht mehr in die Flüssigkeit eintauchen, so wird der Basisstrom unterbrochen. Hiermit werden die drei Transistoren gesperrt. Folglich fällt der Relaisanker ab.

Dieser versetzt den Transistor T_2 in den Durchlaßzustand, womit sein Collectorstrom den Transistor T_3 ebenfalls in den Durchlaßzustand versetzt. Das Relais zieht aufgrund dessen seinen Anker an.

Ein weiteres Ansteigen des Leitwertes zwischen den beiden Sondendrähten ändert an dem Zustand des Endstufen-Transistors kaum mehr etwas: Die Collector-Emitter-Spannung des Transistors T_3 ist mit der Eingangs-Spannung der Darlington-Schaltung identisch. Diese kann nicht unter 3 · 0,7 V herunter gehen, wenn die Transistoren sich im Durchlaßzustand befinden.

Sinkt der Leitwert zwischen den zwei Sondendrähten wieder ab, so kommt es zu einem Sperren der Transistoren, was das Abfallen des Relaisankers zur Folge hat. Eine dabei an sich mögliche Abschalt-Überspannung wird mit der Freilaufdiode verhindert. Diese Diode ermöglicht ein Abklingen des Relaisstromes und so den allmählichen Abbau des Relais-Magnetfeldes.

Einige Angaben über die hier in Betracht kommenden Werte

Die Transistoren T_1 und T_2 sollen möglichst hohe Collector-Basis-Gleichstromverhältnisse bei niedrigen Collectorstromwerten aufweisen. Der Transistor T_3 muß den Relaisstrom aushalten (Beispiele: Transistoren T_1 und T_2 Fairchild C 450, Transistor T_3 Fairchild C 420). Als Widerstand R_1 wählt man einen linear einstellbaren Widerstand mit einem Wert von 1 MΩ. Die Speisespannung muß »erdfrei« sein, da hier die collectorseitige Sonde zu erden ist. »**Erdfrei**« bedeutet: keine leitende Verbindung mit der Erde, also gute Isolation gegen sie. Als Speisespannung kommen 24 V in Betracht. Dazu paßt ein Relais-Wicklungswiderstand von 480 Ω. Die im Relais in Wärme umgesetzte Leistung ist hierbei mit 1,2 W gegeben.

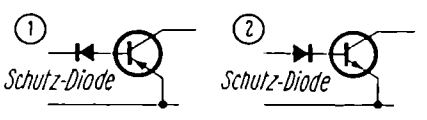
Wichtigstes über die Darlingtonschaltung

- Bei Bedarf eines großen Verhältnisses des vom Basisstrom beeinflußten Transistor-Stromes zu dem ihm zugeordneten Basisstrom kombiniert man zwei oder drei Transistor-Systeme.
- Eine solche Kombination zweier oder dreier Transistoren mit derselben Zonenfolge (alle pnp oder alle npn) wird Darlington-Schaltung genannt.
- Jede dieser Kombinationen hat — wie ein einzelner npn- bzw. pnp-Transistor — nur einen Basisanschluß, einen Emitter-Anschluß und einen Collector-Anschluß.
- Das Collector-Basis-Gleichstromverhältnis einer derartigen Kombination ist gleich dem Produkt der für die Transistoren dieser Kombination geltenden Stromverhältnisse.
- Neuerdings kombiniert man einer Darlingtonschaltung gemäß auch einen pnp-Transistor mit einem npn-Transistor.

Ventildiode in Transistor-Schutzschaltung

Schutz der Emitter-Basis-Strecke

Transistoren bestimmter Typen vertragen (wie in den einschlägigen Datenlisten angegeben) an der Basis-Emitter-Strecke nur relativ geringe Sperrspannungen. In Kipp-, Regel- und Steuerschaltungen ist nicht selten mit Sperrspannungen zu rechnen, die für die Basis-Emitter-Strecke derartiger Transistoren unzulässig hoch sind.
In solchen Fällen schützt man die sonst gefährdete Basis-Emitter-Sperrschicht des Transistors, indem man in die Basis-Zuleitung eine Ventildiode einfügt. Diese Diode muß natürlich für die Spannung, gegen die sie schützen soll, in Sperrichtung gepolt sein. Das zeigen die **Bilder 1** und **2**. Die Ventildiode verhindert einen die Basis-Emitter-Sperrschicht schädigenden Sperrstrom.



Jeweils eine Schutzdiode vor der Basis eines npn- bzw. npn-Transistors. Die Durchlaßrichtung der Diode entspricht der Pfeilspitze in dem Emitterstrich.

Man verwendet zu diesem Zweck — wegen ihrer hohen Sperrwiderstände — Silizium-Dioden.

Schutzdiode und Transistor-Steuerung

Man beachte die Polung der Diode. Sie muß mit der Durchlaßrichtung der Basis-Emitter-Diode des Transistors in Einklang stehen (gleiche Richtungen für das Dreieck des Dioden-Schaltzeichens und der Pfeilspitze in der Emitterleitung des Transistor-Schaltzeichens).
Eine Silizium-Ventildiode hat eine Schleusenspannung von ungefähr 0,7 V. Das muß für das Aufsteuern des Transistors beachtet werden. Hierfür benötigt man deshalb außer den 0,7 V, die ein Silizium-Transistor als seine Basis-Emitter-Schleusenspannung dafür erfordert, nochmals 0,7 V für die Diode.

Die Schutzdioden-Kapazität

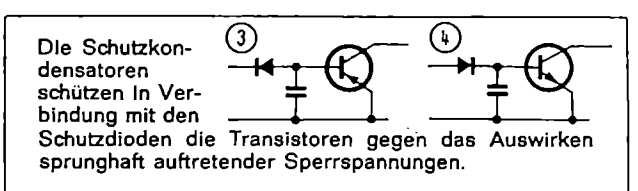
Die Diode allein schützt den Transistor wohl gegen zu hohe Basis-Emitter-Sperr-Gleichspannungen und auch gegen allmählich ansteigende Spannungen. Gegen sprunghaft auftretende Sperrspannungen bietet sie jedoch keinen zuverlässigen Schutz.
Zwischen den beiden Dioden-Anschlüssen besteht nämlich stets eine Kapazität. Ein Anteil hiervon ist die Sperrschicht-Kapazität. Der andere Anteil wird von der »Gehäuse-Kapazität« der Diode dargestellt.

Über diese Dioden-Gesamtkapazität könnten den Transistor sperrende Spannungssprünge auf die Basis-Emitter-Strecke des Transistors übertragen werden. Dabei träte an dieser Strecke ein Anteil des Spannungssprunges auf. Dieser Anteil hat einen umso höheren Wert, je geringer die Basis-Emitter-Kapazität im Vergleich zur Dioden-Kapazität ist. Es handelt sich dabei um eine kapazitive Spannungsteilung zwischen der Ventildiode und der Basis-Emitter-Sperrschicht des Transistors.

Zur Schutzdiode ein Schutzkondensator

Indem man parallel zur Basis-Emitter-Strecke des Transistors einen Kondensator schaltet, erreicht man, daß der Hauptteil des Spannungssprunges an der Schutzdiode auftritt (**Bilder 3** und **4**). Der Spannungssprung verteilt sich dabei einerseits auf die Kapazität der Schutzdiode und anderseits auf die höhere Kapazität der Parallelschaltung der Basis-Emitter-Strecke des Transistors mit dem Kondensator. Auch in diesem Fall verhalten sich selbstverständlich die Teilspannungen umgekehrt wie die Kapazitäten.

Die Kapazität des Parallel-Kondensators soll deshalb ein Vielfaches der Gesamtkapazität der gesperrten Diode betragen. Eine zu große Kapazität könnte allerdings die Transistor-Schaltzeiten unzulässig erhöhen.

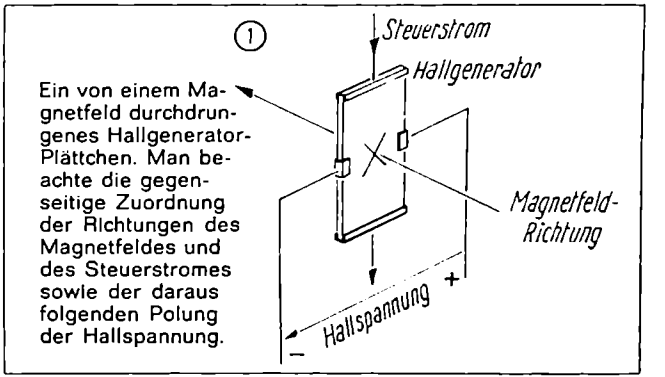


Die Schutzkondensatoren schützen in Verbindung mit den Schutzdioden die Transistoren gegen das Auswirken sprunghaft auftretender Sperrspannungen.

Wichtigstes über Ventildioden als Schutzdioden

- Ventildioden verwendet man zum Schutz gegen zu hohe Spannungen, die mit dieser Polung nicht benötigt werden.
- Hierfür nutzt man die hohen Sperrwiderstände von Silizium-Dioden aus.
- Die Silizium-Diode wird — für Spannungen gegen die sie schützen soll, in Sperrichtung gepolt — wie ein Vorwiderstand vor die zu schützende Strecke geschaltet.
- Trotz des hohen Sperrwiderstandes können Sperrspannungssprünge über die Kapazität der gesperrten Diode übertragen werden.
- Um die Sperrspannungssprünge an der zu schützenden Strecke klein zu halten, legt man ihr einen Kondensator parallel, dessen Kapazität wesentlich größer ist als die Kapazität der gesperrten Schutzdiode.
- Der Spannungssprung teilt sich auf die Diode und die zu schützende Strecke im umgekehrten Verhältnis der Kapazitäten auf.

Hallgenerator zum Überwachen niedriger Drehgeschwindigkeiten



Ein von einem Magnetfeld durchdrungenes Hallgenerator-Plättchen. Man beachte die gegenseitige Zuordnung der Richtungen des Magnetfeldes und des Steuerstromes sowie der daraus folgenden Polung der Hallspannung.

Hallgenerator

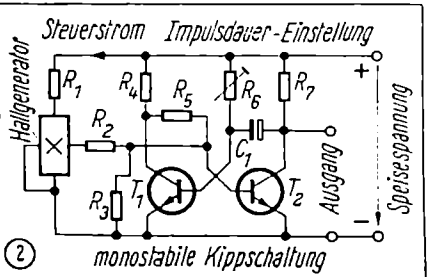
Ein Hallgenerator ist ein Halbleiter-Plättchen von Rechteck-Form. Das Plättchen hat zwei Anschlüsse, die sich über zwei einander gegenüberliegende Kanten erstrekken, und zwei weitere Anschlüsse in den Mitten der beiden anderen Rechteck-Seiten (**Bild 1**).
Wenn das Plättchen von einem Strom (hier **Steuerstrom** genannt) durchflossen ist, bewirkt ein das Plättchen durchdringendes **Steuermagnetfeld** zwischen den Hallspannungs-Anschlüssen eine Spannung. Diese Spannung wird **Hallspannung** genannt. Der Hallspannung ist ein relativ niedriger Ausgangswiderstand (der **hallseitige Ausgangswiderstand**) zugeordnet.

Hallgenerator als Magnetfeldfühler

Ordnet man beispielsweise neben einem umlaufenden Teil einen Hallgenerator derart an, daß er von dem Magnetfeld eines kleinen, auf dem umlaufenden Teil befestigten Dauermagneten während jedes Umlaufes einmal durchdrungen wird, so kann man damit bei jedem Umlauf einen Hallspannungs-Impuls gewinnen.
Um diese Impulse für Steuerungs- und Regelungszwecke verwenden zu können, muß man dafür sorgen, daß man einander in Amplitude und Dauer übereinstimmende Rechteck-Impulse erhält. Hierzu dient eine monostabile Kippschaltung, die von den Hallspannungs-Impulsen gesteuert wird.

Die Schaltung und ihre Arbeitsweise

Bild 2 veranschaulicht den Schaltplan, in der aus den Hallspannungs-Impulsen einander durchweg gleiche Rechteck-Impulse abgeleitet werden.
Solange der Hallgenerator nicht von einem Magnetfeld



Monostabile Kippschaltung von der Hallspannung in den astabilen Zustand versetzt. Dimensionierungshinweise: Hallgenerator: Siemens SBV 566, R_1 = 470 Ω, R_2 = 1 kΩ, R_3 = 15 kΩ, R_4 = 1,2 kΩ, R_5 = 33 kΩ, R_6 = 100 kΩ, R_7 = 1,2 kΩ, C_1 = 10 µF, Speisespannung stabilisiert 6 V, T_1, T_2 = NF-Vorstufen-Transistoren. Drehgeschwindigkeiten (20 ... 50) U/min.

durchdrungen wird, ist der Transistor T_1 durchgeschaltet: Er erhält den hierzu gehörenden Basisstrom über den Einstellwiderstand R_6. An der dann niedrigen Collector-Emitter-Restspannung des Transistors T_1 liegt der Basis-Spannungsteiler des Transistors T_2. Dieser Spannungsteiler besteht aus dem Widerstand R_5 sowie aus der Kombination der Widerstände R_2 und R_3 mit dem Hallgenerator-Widerstand. Die daraus für den Transistor T_2 resultierende Basis-Emitterspannung ist so gering, daß dieser Transistor jetzt gesperrt bleibt.

Bei der hierfür passenden Richtung, mit der das Dauermagnetfeld den Hallgenerator durchsetzt, tritt an dem Hallgenerator eine Hallspannung mit solcher Polung auf, daß diese Spannung den Sperrzustand des Transistors T_2 aufhebt (siehe hierzu Bild 1). Das damit verbundene Absinken der Collector-Emitter-Spannung des Transistors T_2 wirkt über den Kondensator C_1 auf den Transistor T_1 sperrend ein. Die deshalb ansteigende Collector-Emitter-Spannung des Transistors T_1 beeinflußt über den Widerstand R_5 den Transistor T_2. Das beschleunigt dessen Übergang in den Durchschaltzustand. Das heißt: Die Schaltung kippt in den Zustand, in dem nun T_2 durchgeschaltet und T_1 gesperrt ist.

Dieser Zustand hält nach dem Ende des Einwirkens des Dauermagnetfeldes auf den Hallgenerator solange an, bis sich der Kondensator C_1 über den Widerstand R_6 und die Collector-Emitter-Strecke des durchgeschalteten Transistors T_2 entladen und mit entgegengesetzter Polung ein wenig aufgeladen hat. Dann geht der Transistor T_1 in den Durchlaßzustand über, was das Kippen der Schaltung in ihren Grundzustand einleitet.

Am Ausgang der Schaltung ergibt sich auf solche Weise als Folge einer vorübergehenden Magnetfeld-Einwirkung auf den Hallgenerator ein negativer Rechteck-Impuls mit einer am Widerstand R_6 einstellbaren Dauer.

Monostabile Kippschaltung

Daß die mit Bild 2 gezeigte Schaltung eine Kippschaltung ist, wissen wir bereits. Wir haben auch erfahren, daß sie mit einem passenden Impuls aus ihrem Grundzustand in einen zweiten Zustand versetzt werden

kann, aus dem sie nach Ablauf einer Zeitspanne in ihren Grundzustand zurückfällt. Von ihren beiden für sie möglichen Zuständen ist somit nur der Grundzustand stabil. Eine Kippschaltung, für die dies zutrifft, heißt **monostabil.** »Mono« besagt, daß nur **ein** Zustand stabil ist.

Weitere Kippschaltungen

Außer den monostabilen Kippschaltungen gibt es noch zwei weitere Kippschaltungsarten, nämlich:

- **bistabile Kippschaltungen** mit zwei stabilen Zuständen und
- **astabile Kippschaltungen,** deren beide Zustände nicht stabil **(instabil)** sind.

Eine bistabile Kippschaltung verbleibt solange in dem Zustand, in dem sie sich gerade befindet bis sie mit Hilfe einer Steuerspannung in den anderen Zustand gekippt wird.

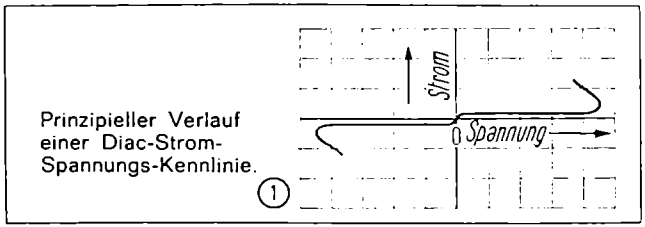
Eine astabile Kippschaltung wechselt zwischen ihren beiden Zuständen ohne äußeres Zutun periodisch. Die astabilen Kippschaltungen wurden demgemäß **»Multivibratoren«** genannt, was man mit »Viel-Zitterer« oder »Viel-Schwinger« verdeutschen könnte.

Leute, denen es nicht liegt, darüber nachzudenken, von was sie reden, sprechen auch von **monostabilen** und **bistabilen Multivibratoren.** Daß das Unsinn ist, merkt jeder, der sich dies auch nur ein klein wenig überlegt.

Wichtigstes über Hallgeneratoren

- Ein Hallgenerator ist ein rechteckiges Halbleiter-Plättchen mit zwei einander gegenüberliegenden Steuerstrom-Anschlüssen und zwei — ebenfalls einander gegenüber — an den Mitten der beiden anderen Rechteckseiten angebrachten Hallspannungs-Anschlüssen.
- Wird das Halbleiter-Plättchen von einem Steuerstrom durchflossen und dabei von einem Magnetfeld durchdrungen, so tritt zwischen den Hallspannungs-Anschlüssen eine Spannung auf.
- Die Polung der Hallspannung richtet sich nach den Richtungen des Steuerstromes und des das Halbleiter-Plättchen durchdringenden Magnetfeldes.
- Der Betrag der Hallspannung ist im Leerlauffall proportional dem Produkt aus den Beträgen des Steuerstromes und der Magnetfelddichte.
- Das das Halbleiter-Plättchen durchdringende Magnetfeld wird im Hinblick auf den Hallgenerator »Steuerfeld« genannt. Manche Leute gebrauchen allerdings für Magnetfeld auch in diesem Zusammenhang den altertümlichen Ausdruck **»Fluß«** oder sprechen da gar von **Kraftfluß.**
- Der Hallgenerator hat einen steuerseitigen Durchgangswiderstand (für den Steuerstrom) und einen hallseitigen Ausgangswiderstand (für den von der Hallspannung bewirkten Strom).
- Die Steuer-Nennströme betragen (20 ... 400) mA.

Diac und Triac zum Wechselstrom-Einstellen



Prinzipieller Verlauf einer Diac-Strom-Spannungs-Kennlinie.

Der Diac

Der Diac ist ein mit nur zwei Anschlüssen versehenes Halbleiter-Bauelement, das für beide Stromrichtungen sperrt, solange die Sperrspannung ihren für den Diac geltenden Durchbruchswert noch nicht erreicht hat. Bei Überschreiten dieses Wertes kippt der Diac mit der Spannung, die eben noch als Sperrspannung auftrat, in den Durchlaßzustand. Um hierbei das Auftreten eines zu hohen Stromes zu verhindern, muß dem Diac ein Widerstand vorgeschaltet sein. Aufgrund dieses Vorwiderstandes springt die Diac-Spannung beim Eintreten des Durchlaßzustandes von dem zum Sperrzustand gehörenden Wert auf den Wert ab, der (bei dem begrenzten Strom) für den Durchlaßzustand gilt.

Die Bezeichnung Diac ist die Abkürzung von **D**iode **a**lternating **c**urrent switch, was mit »Diode zum Schalten von Wechselstrom« übersetzt werden kann.

Der Diac hat Eigenschaften, die im Prinzip denen einer bezüglich ihrer Elektroden symmetrischen Glimmröhre ganz ungefähr entsprechenden (**Bild 1**).

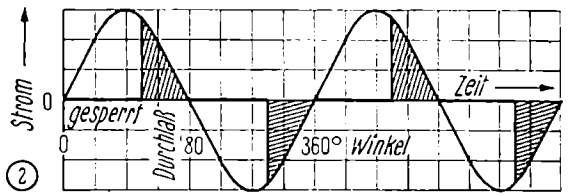
Zweck des Diac

Man verwendet den Diac hier als Schalter für das Entladen eines Kondensators, dessen Entladestrom den Triac in seinen Durchlaßzustand zu kippen hat.

Wechselstrom-Einsteller (Wechselstrom-Steller)

Man stellt den Wechselstromwert ein, indem man zu einem wählbaren Zeitpunkt nach Beginn einer jeden Wechselspannungs-Halbwelle den Triac entsperrt. Man kann hiermit den (mittleren) Wechselstromwert von dem Wert des Stromes, der mit der um die Triac-Durchlaßspannung verminderten Speisespannung durch den Lastwiderstand getrieben wird, bis auf den Wert Null stetig herabsetzen.

Das **Bild 2** zeigt als Beispiel einen Fall, in dem der Stromflußwinkel je Halbwelle auf ungefähr 68° reduziert ist.



Zeitlicher Verlauf des Stromes bei Sinuswechselspannung und ohmscher Last einmal für einen Stromflußwinkel von 180° je Halbperiode und einmal (schraffiert) für 68° statt 180°.

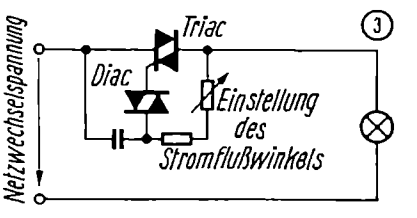
Die Schaltung

Bild 3 enthält den Schaltplan. Darin sind sofort zu erkennen: der als Schalter dienende Triac und die Glühlampe, die über den Triac aus dem Wechselstromnetz gespeist wird.

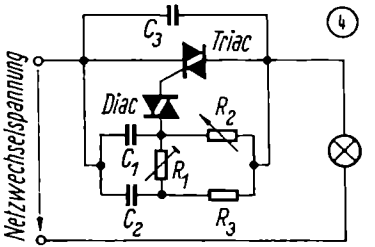
Zum Entsperren des Triac dient der Entladestrom des Kondensators C_1. Dieser Kondensator wird bei gesperrtem Triac von der jeweils herrschenden Wechselspannungs-Halbwelle aufgeladen, wobei mit dem Einstellwiderstand die Anstiegsgeschwindigkeit der Kondensatorspannung beeinflußbar ist.

Sowie die Kondensatorspannung die Summe aus der Diac-Durchbruchspannung und der Schleusenspannung der Triac-Steuerstrecke erreicht hat, entlädt sich der Kondensator vom Wert der Diac-Durchbruchspannung bis auf den Spannungswert, der zum Durchlaßzustand des Diac gehört. Der sich so ergebende Entladestrom-Impuls stellt für den Triac einen Starterstrom-Impuls dar, der den Stromdurchgang durch den Triac einleitet. Gegen Ende der Wechselspannungs-Halbwelle sinkt der den Triac und die Glühlampe durchfließende Strom unter den für den Triac geltenden Haltebetrag ab. Von da an ist der Triac solange blockiert, bis er über den Diac während der nächsten Spannungs-Halbwelle neuerdings in den Durchlaßzustand versetzt wird.

Im Verlauf jeder einzelnen Spannungs-Halbwelle, d. h. in jeder Halbperiode wird der Wert der Diac-Durchlaßspannung um so eher erreicht, je weiter man den Widerstandswert des Einstellwiderstandes herabsetzt. Je früher aber der Diac jeweils in den Durchlaßzustand



Triac-Schaltung für einstellbaren Stromflußwinkel. Dieser fällt umso größer aus, je rascher der Kondensator während jeder Spannungs-Halbwelle aufgeladen wird, d. h. je kleiner der eingestellte Widerstandswert ist. Dimensionierungshinweis: Stellwiderstand 500 kΩ, Festwiderstand 2 kΩ, Kondensator 100 nF.



Ergänzte Schaltung. C_3 wirkt Rundfunkstörungen entgegen Bemessungshinweise: $C_1 = C_2 = C_3 \approx$ 100 nF, $R_1 =$ 200 kΩ, $R_2 =$ 500 kΩ, $R_3 =$ 150 kΩ.

kippt, desto eher gibt der Triac den Weg für den Glühlampenstrom frei und desto höher fällt deshalb der Mittelwert des Glühlampenstromes aus.

Um in der Schaltung nach Bild 3 die Lampe aufleuchten zu lassen, muß man einen kleinen Widerstandswert einstellen. Zuvor wird der Kondensator jeweils zwischen den beiden Scheitelwerten seiner Spannung über den Widerstand umgeladen. Wenn der Diac kippt und so der Triac gestartet ist, wird der Kondensator stets über den Diac teilentladen. Das verkürzt die Umladezeit und bewirkt so einen großen Stromflußwinkel. Daher leuchtet die Lampe sofort hell. Erst anschließend kann man die Helligkeit herabsetzen. Dieses Verhalten heißt **Hysterese-Effekt**.

Ihn mildert man gemäß **Bild 4** mit dem Zufügen von C_2, R_1 und R_3. Über R_1 wird der teilentladene Kondensator C_1 aus C_2 nachgeladen.

Wichtigstes über den Diac

- Der Diac ist ein sich elektrisch symmetrisch verhaltendes Halbleiter-Bauelement mit zwei Anschlüssen.
- Er sperrt für beide Polungen der angelegten Spannung, solange der Betrag dieser Spannung unter dem seiner Durchbruchspannung bleibt.
- Erreicht die Spannung am Diac den Durchbruchwert, so kippt der Diac in den Durchlaßzustand.
- Damit sich im Durchlaßzustand kein unzulässig hoher Strom ergibt, muß dem Diac stets ein Widerstand vorgeschaltet sein.
- Der Diac verhält sich ähnlich wie eine Glimmröhre, deren Spannung auf den Brennwert abkippt, wenn der (höhere) Zündwert von der Spannung erreicht wurde. Die Kippspannung der Diac beträgt nur etwa 30 V.
- Den Diac verwendet man vorzugsweise, um mit ihm die Starterstrom-Impulse zustande zu bringen, mit denen der Triac während jeder Wechselspannungs-Halbwelle in den Durchlaßzustand versetzt wird.
- Man nutzt dabei den Diac als Schalter aus, der bei Erreichen seiner Durchbruchspannung den Weg für einen Kondensator-Entladestrom freigibt.
- Der Kondensator-Entladestrom dient dazu, den Triac jeweils in den Durchlaßzustand zu kippen.
- Der Triac fällt bei Unterschreiten seines Haltestromwertes gegen Ende jeder Wechselspannungs-Halbwelle in den Blockierzustand (Sperrzustand) zurück.

Thyristor zum Steuern eines Gleichstrommotors

Steuern der Drehgeschwindigkeit mit Vorwiderstand

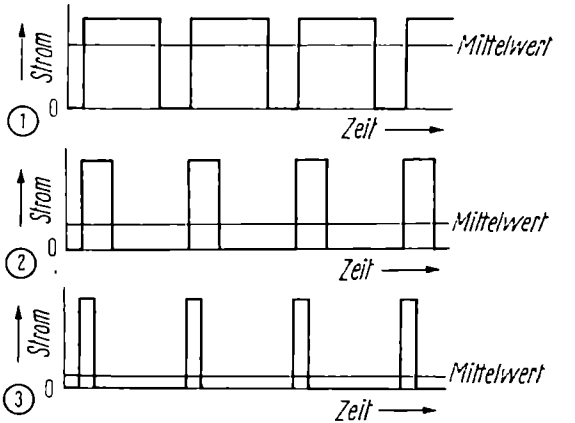
Die Drehgeschwindigkeit eines Gleichstrommotors kann mit Hilfe eines einstellbaren Vorwiderstandes beeinflußt werden. Dieser Vorwiderstand läßt sich außerdem für das Anlassen des Motors als Anlaßwiderstand verwenden. Jedoch hat der einstellbare Vorwiderstand zwei Nachteile:

- In ihm fallen erhebliche Verluste an elektrischer Arbeit an, woraus unerwünschte Wärme entsteht, und womit der Gesamt-Wirkungsgrad herabgesetzt wird.
- Außerdem muß der Vorwiderstand mechanisch verstellt werden.

Statt Drehgeschwindigkeit oder **Umlaufgeschwindigkeit** sagt man vielfach kurz »**Drehzahl**«, was nur dann in Ordnung ist, wenn man z. B. »je Minute« zufügt.

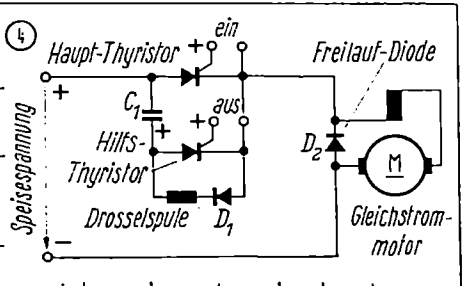
Periodisches Unterbrechen statt Vorwiderstand

Verluste kann man vermeiden, indem man statt des einstellbaren Vorwiderstandes einen Schalter verwendet, mit dem der Motorstrom in rascher Folge unterbrochen werden kann. Um die Motor-Drehgeschwindigkeit herabzusetzen nimmt man diese Stromunterbrechungen vor. Man reduziert damit nicht den Strom an sich sondern setzt mit dem Unterbrechen des Stromes seinen Mittelwert herab. Den Strom-Mittelwert ändert man, indem man das Verhältnis zwischen **Strom-Flußzeit** und **Pause** passend variiert. (**Bilder 1 ... 3**). Hierzu



Die Folgen periodisch auftretender Rechteck-Stromimpulse. Sie unterscheiden sich voneinander in dem Verhältnis der Impulsdauer zur Pausendauer. Sie stimmen aber hinsichtlich der Impulsperiodendauer (Summe aus Impuls- und Pausendauer) überein.

ist ein mechanischer Schalter ungeeignet. Man muß den Motorstrom nämlich in recht rascher Folge ein- und ausschalten, damit die Motor-Drehgeschwindigkeit nicht in ein unerwünschtes Schwanken verfällt. Ein rasches Schalten wird mit Hilfe der Elektronik ermöglicht.
Die als zweiter Nachteil des Vorwiderstandes genannte, für ihn bestehende Notwendigkeit des mechanischen Betätigens, ist mittels Elektronik ebenfalls zu vermeiden.
Man verwendet in diesem Sinne statt eines mechanischen Schalters den in **Bild 4** eingetragenen Haupt-Thyristor.
Als **Haupt-Thyristor** ist dieser Thyristor deshalb bezeichnet, weil bei Gleichstrombetrieb außer diesem als Schalter dienenden Thyristor ein zweiter Thyristor zum Blockieren des Haupt-Thyristors (also ein **Hilfs-Thyristor**) notwendig ist.



Schaltung, in die ein an einer Speise-Gleichspannung betriebener Gleichstrommotor mit einer Thyristorschaltung gesteuert wird.

Der Motorstrom wird von dem entsprechend gesteuerten Haupt-Thyristor durchgelassen. Der Hilfsthyristor hat die Aufgabe, den Haupt-Thyristor jeweils zu sperren. Beide Transistoren werden wechselweise mit Hilfe von Starter-Impulsen gestartet.

Der Thyristor

Hier kurz eine Wiederholung dessen, was für das folgende wichtig ist: Ein Thyristor hat einen Anoden-, einen Katoden- und einen Starter-Anschluß.
Die Anoden-Katoden-Strecke eines Thyristors spielt für die Stromrichtung, zu der eine positive Anoden-Katodenspannung gehört, die Rolle eines elektronischen Schalters, mit dem man viel schneller schalten kann als mit einem elektromechanischen Schalter. Das Einschalten wird mittels des Starters bewirkt:
Solange man keinen (positiven) Starterstrom fließen läßt, ist die Anoden-Katoden-Strecke des Thyristors für beide Stromrichtungen gesperrt bzw. blockiert. Die Sperrung des Thyristors bleibt für die Stromrichtung, für die die Anode negativ gegen die Katode ist, vom Starter unbeeinflußt.
Herrscht am Thyristor eine positive Anoden-Katoden-Spannung, so kann der Stromdurchgang durch die Anoden-Katoden-Strecke des Thyristors mit einem positiven Starter-Katoden-Strom eingeleitet werden. Mit Einsetzen des Anoden-Katoden-Stromes hat der Starter seinen Einfluß auf diesen Stromdurchgang verloren.

Die Anoden-Katoden-Strecke des Thyristors kippt erst dann in den Blockierzustand zurück, wenn man den diese Strecke durchfließenden Strom bis unter einen bestimmten, sehr niedrigen Wert (den Haltewert) absenkt.

Das Sperren des Thyristors im Gleichstrombetrieb

Zum Sperren des Thyristors dient in der hier gezeigten Schaltung das Entladen des Kondensators C_1. Dieser Kondensator ist, kurz nachdem sich für den Haupt-Thyristor der Durchlaßzustand ergeben hat, über die Diode D_1 unter Mitwirkung der Drosselspule in dem Sinn aufgeladen, der in Bild 4 mit dem Pluszeichen am Kondensator-Schaltzeichen angedeutet wird.
Um den Strom, der den Haupt-Thyristor durchfließt, unter den Haltewert herunterzudrücken, versetzt man den Hilfs-Thyristor mittels eines positiven Starterstromes in den Durchlaßzustand. Damit ist der Weg für den Entladestrom des Kondensators C_1 freigegeben. Dieser Strom schließt sich über den Haupt-Thyristor entgegen dem von der Speisespannung bewirkten Strom. Das bedeutet:
In dem Haupt-Thyristor tritt jetzt nurmehr die Differenz zwischen Speisestrom und Entladestrom auf. Diese Differenz macht man mit dementsprechendem Auslegen der Schaltung so klein, daß sie den Haltewert des Thyristorstromes unterschreitet. So erreicht man, daß der Haupt-Thyristor in den Sperrzustand zurückfällt.
Nachdem sich der Kondensator C_1 völlig entladen hat, wird er (über den im Augenblick noch stromführenden Hilfs-Thyristor und den Motor) mit der Polung, die dem an C_1 eingetragenen Pluszeichen entgegengesetzt ist, nahezu auf die volle Speisespannung aufgeladen. (An der Speisespannung fehlt dabei nur die geringe Durchlaßspannung der Freilauf-Diode, über die der Motorstrom jetzt abklingt.)
Wird dann der Haupt-Thyristor über seinen Starter von neuem in den Durchlaßzustand versetzt, so entlädt sich der Kondensator C_1 über den Haupt-Thyristor. Hierbei durchfließt sein Entladestrom die Drosselspule sowie die Diode D_1. Die Drosselspule hält diesen Strom auch nach dem Entladen des Kondensators C_1 aufrecht. Jetzt ist der Strom für den Kondensator ein Ladestrom. Mit ihm wird der Kondensator C_1 in dem mit dem Pluszeichen angedeuteten Sinn aufgeladen. Damit erhält er die Ladung, die zum nachfolgenden Sperren des Haupt-Thyristors erforderlich ist.
Die aus dem Hilfs-Thyristor, dem Kondensator, der Drosselspule und der Diode D_1 aufgebaute Schaltung kann man, wie aus dem Vorstehenden folgt, auch **»Löschschaltung«** oder **»Löscheinrichtung«** nennen, wenn man unter »Löschen« das Kippen eines Thyristors aus seinem Durchlaßzustand in seinen Sperrzustand, d. h. das Blockieren des Thyristors verstehen möchte.

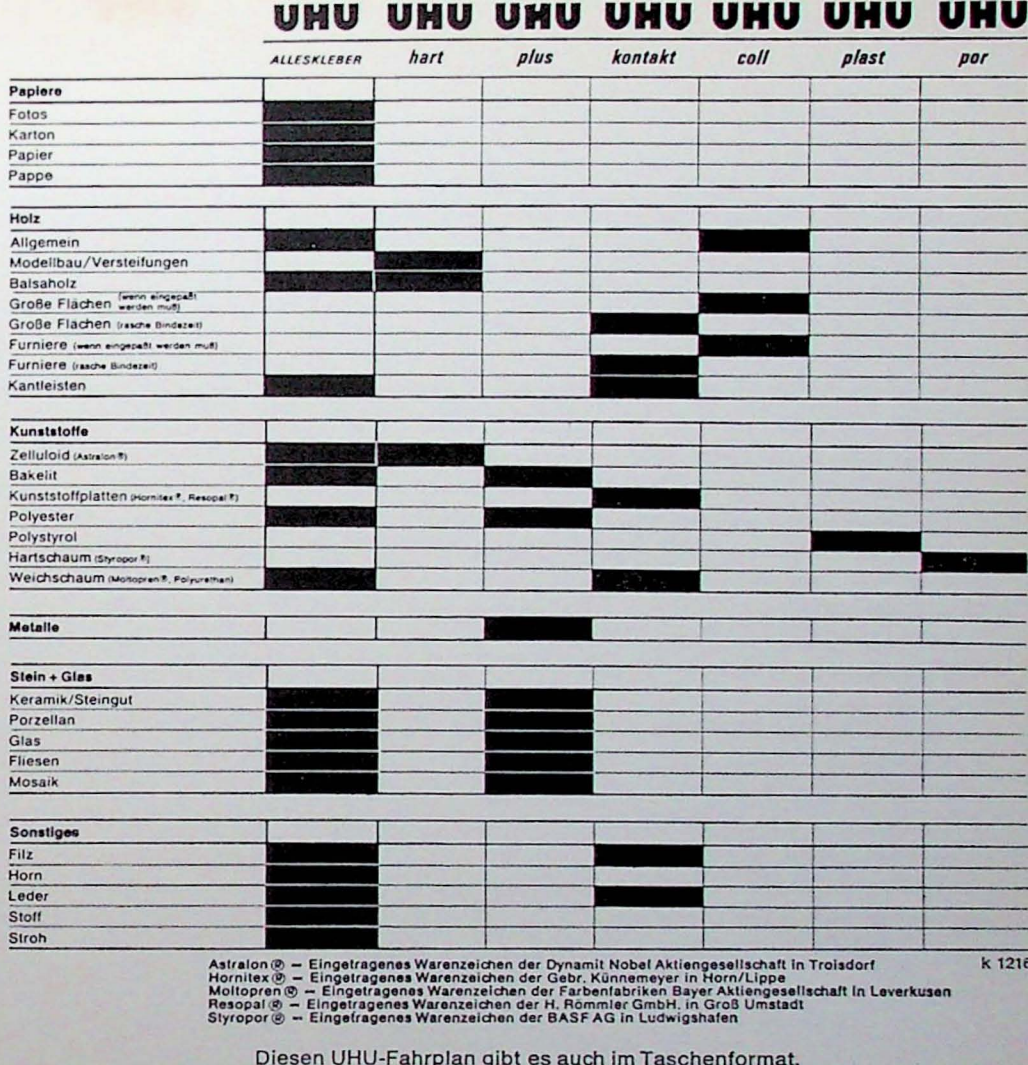
Wichtigstes über den Thyristor und seinen Gebrauch als Gleichstromschalter

- Der Thyristor hat einen Anoden-, einen Katoden- und einen Starter-Anschluß.
- Der Thyristor ist ein elektrisch betätigter Schalter für Ströme, die ihn in Richtung von seiner Anode nach seiner Katode durchfließen.
- Für die entgegengesetzte Stromrichtung bleibt der Thyristor gesperrt.
- Den Stromdurchgang von der Thyristor-Anode nach der Thyristor-Katode leitet man mit einem (vergleichsweise schwachen) positiven Starter-Katoden-Strom ein.
- Der Durchlaßzustand des Thyristors bleibt unabhängig von einem Starterstrom bestehen, bis man den die Anoden-Katoden-Strecke durchfließenden Strom unter einen bestimmten (geringen) Wert — den Haltewert — absenkt.
- Um einen Thyristor als Gleichstromschalter verwenden zu können, muß man zum Sperren des Thyristors eine besondere Löschschaltung verwenden.
- Diese »Löschschaltung« hat den Zweck, den Thyristorstrom augenblicksweise unter seinen Haltewert abzusenken, womit der Thyristor gesperrt wird.
- Der Gegenstrom muß einen solchen Wert haben, daß damit der Thyristor-Reststrom (Durchlaßstrom vermindert um den Gegenstrom) unter den Haltewert abgesenkt wird.
- Statt Löschen und Löschschaltung sollte man die Ausdrücke Sperren und Sperrschaltung verwenden. Leider haben sich Löschen und Löschschaltung aber ziemlich fest eingebürgert.
- Die Sperrschaltung enthält als wesentlichste Teile einen Kondensator, der durch den Thyristor als Entladestrom einen Gegenstrom treibt und einen zweiten Thyristor, mit dem der Kondensator-Entladestromweg geschlossen wird.

Abkühl-Zeitkonstante 44
Achsenkreuz-Nullpunkt 18
Admittanz 14
Änderung des Stromwertes 12
Anode (Thyristor) 17
Anode (Triac) 60
Anschluß (Triac) 60
Antiparallelschaltung 20
Anzugsstrom (Elektromagn.) 23
Astabile Kippschaltung 71
Ausgangswicklung (Transf.) 37
Ausgangswiderstand (Spannungsteller) 53
Außenschenkel (Eisenkern) 37
Ausstreuung, magnetische 42
Basis-Vorwiderstand 28
Begrenzerwiderstand 20
Bidirektionaler Thyristor = Triac 58
Bistabile Kippschaltung 71
Bistabile Schaltung 26
Blechschnitt 41
Blindleitwert 14
Blindwiderstand 11, 12
Blockierkennlinien 18
Blockierzustand 18
Bürsten (Motor) 49
Collector-Basis-Stromverh. 64
Collectorschaltung 9
Conductanz 14
Dämmerungsschalter 34
Darlingtonschaltung 64
Diac 72
Differentieller negativer Leitwert 57
Diode als Transistorschutz 67
Dotieren 16
Drehfaktor 12
Drehzahl 75
Drosselspule 11
Durchlaßkennlinie (Diode) 56
Durchlaßkennlinie (Thyristor) 18
Durchlaßkennlinie (Triac) 59
Durchlaßkennlinie (Tunneldiode) 54
Durchlaßrichtung (Diode) 59
Effektivwert 47, 48
El-Kern (Transformator) 41
Eingangswicklung 37
Einheit der Induktivität 12
Einheit der Magnetfelddichte 61
Eisenkern (Transf.) 37, 38, 41
Elektromagnet 23
Emitterfolger 9
Erdfrei 66
Erregen (Elektromagnet) 23
Feldplatte 61
Fernelnstellung 45
Fernsteuerung 44
Fluß (Magnetfeld) 71
Fluß-Sperrspannung = Blockierspannung 18
Fremdatom 16
Fremdgeheizte Heißleiter 43
Gate = Starter 17
Gate-Triggerstrom = Thyristor-Steuerstrom 17
Gauß 61
Gitter = Starter 17
Gitter = Steuerelektrode 34
Gleichsinnige Schichtung 41
Gleichstrom-Steuerung mit Thyristor 75
Glimmthyratron 34
Halbweg-Thyristor = Thyristor 58
Hallgenerator 69
Hallseitiger Ausgangswiderstand 69
Haltestrom (Elektromagnet) 23
Haltestrom (Thyristor) 18
Haltestrom (Triac) 59
Hauptkathode 34
Hauptthyristor 76
Heißleiter, fremdgeheizt 43
Henry (Induktivitäts-Einheit) 12
Hilfskatode 34
Hilfsthyristor 76
Höckerstrom (Tunnel-Diode) 54
Hysterese-Effekt (Triac-Schaltung) 74
Hysterese-Spannung = Intervallspannung 26
Hysteresewert = Schaltintervall 27
Imaginäre Einheit 13
Imaginärer Leitwert 14
Imaginärer Widerstand 13
Imaginärteil 13, 14
Impedanz 13
Impedanz-Dreieck 14
Impedanzwandler 10
Impulsdach 55
Impulsflanke 55
Impuls-Restaurierung 54
Induktiver Widerstand 12
Induktivität 12
Intervallspannung = Hysteresespannung 26
Joch (Eisenkern) 37
Katoden (Glimmthyratron) 34
Katode (Thyristor) 17
Kilogauß 61
Kippschaltung 70
Klemm-Diode 56
Klemmen 56
Komplexer Leitwert 14
Komplexer Widerstand 13
Kopplg. npn-pnp-Transistor 63
Kraftfluß (Magnetfeld) 71
Kreisfrequenz 12
Kristallplättchen 16
Kristallzone 16
Kurzschlußwicklung (Relais) 36
Längsglied 45
Last 40
Läufer 49
Leerlaufstrom (Transf.) 39
L-Glied 45
Leitwert-Imaginärteil 14

Leitwert, differentiell, negativ 57
Leitwert, komplex 14
Leitwert, Realteil 14
Leitwert, reell 14
Lichtrelais 35
Liniendichte = Magnetfelddichte 61, 69
Löscheinrichtung (Thyristor) 77
Löschen (Thyristor) 19, 77
Magnetfelddichte 61, 69
Magnetfeldfühler 61, 62
Magnetische Ausstreuung 42
Magnetischer Widerstand 23
Magnetisierungs-Wechselstrom 39
Mittelschenkel (Eisenkern) 37, 42
Mittelwert, zeitlicher 20, 48
M-Kern 41
Monostabile Kippschaltung 70
Motorsteuerung 74
Multivibrator 71
Negativer differentieller Leitwert 57
Netzteil 36
Netztransformator 38
Netzwicklung 38
Normreihe 30
Notlichtschaltung 32
npn-pnp-Kopplung 63
Pegelstands-Überwachung 65
P-Kern (Transformator) 41
pnp-npn-Kopplung 63
Positiver Sperrstrom 19
Primärwicklung 38
Pulsierende Spannung 48
Quelle 53
Querglied 45
Reaktanz 13
Realteil 13, 14
Rechteckimpuls 55
Reeller Leitwert 14
Reeller Widerstand 13
Referenzverstärker 51
Relais 36
Resistanz 13
Rotor = Läufer 49
Rückwärtsrichtung (Diode) 54
Schaltintervall 27
Scheinleitwert = Admittanz 14
Scheinwiderstand = Impedanz 13
Scheitelwert 20
Schichtung (Eisenkern) 41
Schleusenspannung 64
Schmitt-Begrenzer 26
Schmitt-Trigger 26, 62
Schutzdiode 67
Schutzkondensator 68
Schutzwiderstand 20, 59
SCR 32
SCR = Thyristor 16, 32, 47, 76
Sekundärwicklung 38
Silizium-Kristall 16
Siliziumventil 17
Sonde 65
Spannungsteiler (Ausgangswiderstand) 52
Spannungs-Übersetzung 40
Sperren des Thyristors 77
Sperrkennlinie 18
Sperrstrom (Thyristor) 19
Sperrwinkel 47
Spitzensperrspannung 19
Spitzenwert 48
Spule 11
Ständer (Motor) 49
Starten (Triac) 58
Starten (Thyristor) 17
Starterspannung 17
Stator = Ständer 49
Steuerbares Ventil 17
Steuerelektrode 17, 34, 58
Steuermagnetfeld 69
Steuerstrom (Hallgenerator) 69
Stoßfuge (Eisenkern) 39
Stromflußwinkel 47
Stromflußzeit 75
Strom-Übersetzung 40
Stromverstärkungsfaktor (Transistor) 24
Stromwandlung 40
Susceptanz 14
Talstrom (Tunnel-Diode) 54
Temperatur-Relais 29
Thyristor 16, 32, 47, 76
Triac 58, 73
Tor (= Starter) 17
Trägheit 43
Transistor-Schutzschaltung 67
Trigger 26
Triode 58
Tunnel-Diode 54
Übersetzung (Transformator) 40
Umlaufgeschwindigkeit 75
Universalmotor 48
Veränderbarer Spannungsteiler 45
Verbraucher 40
Verstärker 9
Vollweg Thyristor = Triac 58
Voltsekunde je Ampere 12
Vorwärtsrichtung (Diode) 54
Wärmeträgheit 43
Wechselseitige Schichtung 41
Wechselstrom-Netzteil 38
Wechselstromschalter 16, 58
Wechselstromschütz 16, 58
Wechselstromsteller 47, 72
Widerstandswandler 10
Windungsspannung 40
Wirkleitwert 14
Wirkwiderstand 12
Zeigerdiagramm 12, 13
Zeitlicher Mittelwert 20
Zone (Kristall) 16
Zündelektrode = Starter 19
Zünden (Thyristor) 19
Zünden (Triac) = Starten des Stromdurchgangs 58
Zündwinkel 48
Zweischenkelkern 41

Was klebe ich womit am besten?



Astralon® – Eingetragenes Warenzeichen der Dynamit Nobel Aktiengesellschaft in Troisdorf
Hornitex® – Eingetragenes Warenzeichen der Gebr. Künnemeyer in Horn/Lippe
Moltopren® – Eingetragenes Warenzeichen der Farbenfabriken Bayer Aktiengesellschaft in Leverkusen
Resopal® – Eingetragenes Warenzeichen der H. Römmler GmbH. in Groß Umstadt
Styropor® – Eingetragenes Warenzeichen der BASF AG in Ludwigshafen

k 1216

Im Falle eines Falles klebt UHU wirklich alles

Diesen UHU-Fahrplan gibt es auch im Taschenformat.
Fordern Sie ihn bitte beim UHU-Werk an. UHU-Werk H.u.M. Fischer · 758 Bühl (Baden)

TOPP

Inhalt des 1. Bandes:

Gleichstromquelle — ihr Sinn und Zweck
Gleichstromquellen in Schaltungen
Widerstand, Widerstandswert und Leitwert
Einstellwiderstände und einstellbare Spannungsteiler
Heiß- und Kaltleiter
Photoleiter
Kondensator an Batterie
Widerstand und Kondensator als RC-Glied
Induktivität beim Schließen eines Gleichstromkreises
Induktivität und Freilaufdiode
Ventil-Diode im Einweggleichrichter
Transistoren zum Schalten von Relais
Z-Dioden für das Stabilisieren von Gleichspannungen
Transistoren in Verstärkerstufe
Transistoren in Gleichspannungskonstanthaltern
Glimmröhren in Kippschaltung

Inhalt des 2. Bandes:

Glimmrelaisröhre in Zeitschalter
Photodiode als »Lichtfühler« in Lichtrelais
Spannungsabhängiger Widerstand (VDR) als Überspannungsschutz
Ventil-Dioden in Dioden-Verknüpfungsgliedern
Komplementär-Transistoren in Blinkschaltung
Wechselstrom und Wechselspannungsquellen
Photoelement als Lichtfühler
Phototransistor in einem Lichtrelais
Glimmröhre zum Stabilisieren von Gleichspannungen
Silizium-npn-Transistor im Inverter
Kondensator an Wechselstromquelle
Elektronischer Druckknopf zum Ein- und Ausschalten
RC-Glied an Wechselspannung
Feldeffekt-Transistor in Verstärkerschaltung
Selen-Ventile im Graetzgleichrichter